CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

THIAGO MARQUES VIANA

Avaliação do comportamento de Concretos de Pós Reativos com incorporação de nanotubos de carbono de paredes múltiplas frente a elevadas temperaturas

Dissertação de Mestrado

Departamento de Engenharia Civil

Belo Horizonte, Fevereiro de 2019

PPGEC – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE CONCRETOS DE PÓS REATIVOS COM INCORPORAÇÃO DE NANOTUBOS DE CARBONO DE PAREDES MÚLTIPLAS FRENTE A ELEVADAS TEMPERATURAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Péter Ludvig
Co-orientador: Prof. Dr. White José dos Santos

BELO HORIZONTE

2019

Viana, Thiago Marques
V614a Avaliação do comportamento de Concretos de Pós Reativos com incorporação de nanotubos de carbono de paredes múltiplas frente a elevadas temperaturas / Thiago Marques Viana. – 2019.
99 f. : il., gráfs, tabs.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Civil.
Orientador: Péter Ludvig.
Coorientador: White José Santos.
Bibliografia: f. 84-90.
Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Civil.

1. Construção de concreto – Teses. 2. Concreto – Inovações tecnológicas – Teses. 3. Nanotecnologia – Teses. 4. Carbono – Teses. 5. Concreto – Efeito de altas temperaturas – Teses. I. Ludvig, Péter. II. Santos, White José. III. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD 624.1834

Elaboração da ficha catalográfica pela Biblioteca-Campus II / CEFET-MG

THIAGO MARQUES VIANA

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE CONCRETOS DE PÓS REATIVOS COM INCORPORAÇÃO DA NANOTUBOS DE CARBONO DE PAREDES MÚLTIPLAS FRENTE A ELEVADAS TEMPERATURAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do CEFET-MG como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

Péter Ludvig
Orientador
Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG

White José dos Santos
Co-Orientador
Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, UFMG

Júnia Nunes de Paula
Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG

Manuel Noël Paul Georges Houmard
Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, UFMG

Belo Horizonte, 07 de fevereiro de 2019

AGRADECIMENTOS

A Deus, por minha vida e minha história, por me fazer forte, saudável e por ter colocado em meu caminho pessoas especiais, sem as quais eu não seria quem sou.

Ao meu orientador Péter Ludvig, por ter compartilhado seus conhecimentos e orientado com maestria a realização da pesquisa, fornecendo sempre um caminho ou alternativa, além de palavras encorajadoras diante das dificuldades.

Ao co-orientador, White José dos Santos, por sua orientação, atenção e dedicação ao longo de muitos anos de parceria em pesquisa, além de ter aceitado participar e enriquecer este trabalho com seus conhecimentos.

Aos membros da banca avaliadora, Manuel Houmard e Júnia Nunes de Paula, por suas disponibilidades e por terem contribuído com a presente pesquisa através de suas avaliações, críticas e sugestões.

A minha amada esposa Thalita Viana, por todo seu amor, carinho e atenção, por estar sempre ao meu lado nos momentos difíceis, oferecendo o seu melhor, além de fazer os meus dias mais doces e leves por viver ao seu lado.

Ao meu padrinho Wanderlúcio dos Santos Viana, por todo apoio, carinho e orientação, por ser como um pai em todos os momentos, representando um exemplo de superação, caráter, retidão e sabedoria.

A minha saudosa mãe, Lourdes Marques Viana, por ser um grande exemplo de força e persistência, por todo amor e carinho que me dedicou em sua vida e, ainda que tenha nos deixado, por sempre estar ao meu lado.

A minha família, em especial a minha cunhada-irmã do coração Thaís Araújo, por todo apoio e carinho, e minha sogra, Maria Luiza, por suas palavras encorajadoras.

Ao CEFET-MG pelo ensino púbico de qualidade, ao PPGEC, pelo curso de mestrado em engenharia civil e aos professores que dividiram seu conhecimento.

Ao coordenador do laboratório do DEC, Ivan Batista Morais, por todo o apoio, muita paciência e por ter compartilhado seus conhecimentos com um aluno de mestrado inexperiente que deu bastante trabalho.

À equipe de estagiários do laboratório do DEC, André Barroso e Isabela Coelho, que muito ajudou na realização desta pesquisa, sempre com muita presteza, cuidado, precisão e um bom humor que tornou tudo mais leve.

Aos colegas do mestrado, pelo companheirismo durante essa árdua jornada.

Aos colegas do grupo de pesquisa em Nanotecnologia do CEFET-MG Vanessa Rocha, Jefferson Alves, Bruno Bacelar e Elayne Marques, por todo seu apoio.

Ao aluno de intercâmbio Mathurin Meudic, que muito contribui com a realização dessa pesquisa, inclusive aplicando sua técnica de captar cada gota de água necessária para as moldagens.

Ao aluno de iniciação científica Rafael Carvalho, por todo seu apoio durante os procedimentos no laboratório.

Ao grande e velho amigo Pedro Salles, pela longa parceria e por sua amizade.

Aos colaboradores do PPGEC, em especial ao Adalberto, Natália, Dayvison e Leonardo por seu apoio.

Às empresas fornecedoras de materiais necessários à realização da pesquisa, Cimentos Mizu, Brasmic Mineração, Silicon, ERCA, Cimentos Cauê.

Ao CTNanotubos, da UFMG, pelo fornecimento de materiais.

À CAPES, por seu apoio ao programa de pós-graduação em engenharia civil do CEFET-MG.

E a todos aqueles que de alguma forma contribuíram com a realização deste trabalho.

EPÍGRAFE

“A mais bela coisa que podemos vivenciar é o mistério. Ele é fonte de qualquer arte verdadeira e qualquer ciência. Aquele que desconhece esta emoção, aquele que não para mais para pensar e não se fascina, está como morto: seus olhos estão fechados.”

Albert Einstein

RESUMO

Os concretos de ultra-alto desempenho (CUAD) são compósitos de cimento com resistência e propriedades consideravelmente superiores às dos concretos de alto desempenho e convencionais. Os concretos de pós reativos (CPR) constituem o tipo de CUAD mais estudado e utilizado, nesse material, os agregados graúdos inexistem, evitando-se os problemas apresentados por concretos convencionais em sua zona de transição. Para alcançar suas propriedades superiores, as misturas de CUAD podem contar com a presença de nanomateriais agindo na estrutura de poros do concreto, dentre eles, os nanotubos de carbono (NTC), utilizados em razão de suas propriedades mecânicas superiores. Uma das maiores lacunas no conhecimento envolvendo os CUAD reside no seu comportamento quando exposto às elevadas temperaturas, sendo o fenômeno do *spalling* (lascamento explosivo em elevadas temperaturas) um aspecto de preocupação por ser característico de materiais com microestrutura muito densa. Considerando-se a estrutura e as propriedades dos NTC, acredita-se que esse nanomaterial possa influenciar esse comportamento. Diante desse contexto, a presente pesquisa teve por objetivo estudar CPR reforçados com diferentes percentuais de NTCPM (Nanotubos de carbono de paredes múltiplas), sendo 0,05 e 0,1% em peso, frente a um traço de referência sem incorporação. Nesse sentido, foi desenvolvido traço de CPR através do modelo de empacotamento de partículas Modificado de Andreassen e corpos de prova do material foram submetidos a regimes de aquecimento lento em três faixas de temperatura (30ºC a 300, 450 e 600ºC) e rápido (30ºC a 600ºC). Após aquecimento, foram avaliadas a ocorrência do fenômeno do *spalling*, a resistência à compressão residual, perda de massa, modificações de densidade aparente e real, além de uma avaliação macroestrutural. Os resultados indicam que a incorporação dos NTC tem efeitos sobre o *spalling*, sugerindo inclusive ser possível preveni-lo ao percentual de 0,1%. A respeito da resistência à compressão residual e da perda de massa, não foram observadas diferenças significativas provenientes da incorporação. Encontram-se evidências de menores perdas percentuais de densidade aparente para temperaturas de até 450ºC, entretanto a avaliação macroestrutural não indicou diferenças morfológicas entre os materiais.

Palavras-chave: Concretos de ultra-alto desempenho, Concretos de pós reativos, *Spalling* , Nanotubos de carbono, Resistência à elevadas temperaturas.

ABSTRACT

Ultra-high performance concretes (UHPC) are cement composites with strength and properties considerably superior to those of high performance and conventional concretes. The reactive powders (RPC) are the most studied and used UHPC type. In this material, coarse aggregates do not exist, avoiding the problems presented by conventional concretes in their transition zone. To achieve its superior properties, the UHPC mixtures can rely on the presence of nanomaterials acting on the pore structure of the concrete, among them, the carbon nanotubes (CNT), used because of their superior mechanical properties. One of the greatest gaps in the knowledge about UHPC lies in its behavior when exposed to high temperatures, and the phenomenon of spalling is an aspect of concern because it is characteristic of materials with very dense microstructure. Considering the structure and properties of CNT, it is believed that this nanomaterial can influence this behavior. In this context, the present study aimed to study reinforced RPC with different percentages of MWCNT (multiple wall carbon nanotubes), being 0.05 and 0.1% by weight, compared to a reference trait without incorporation. In this sense, a RPC trait was developed through the Modified Andreassen particle packaging model, and test specimens of the material were submitted to slow heating regimes in three temperature ranges (30ºC to 300, 450 and 600ºC) and fast (30ºC to 600°C). After heating, the occurrence of the spalling phenomenon, the residual resistance to compression, loss of mass, modifications of apparent and actual density, and a macrostructural evaluation were evaluated. The results indicate that the incorporation of CNT has effects on spalling, even suggesting that it can be prevented at a percentage of 0.1%. Regarding the residual compressive strength and the mass loss, no significant differences were observed from the incorporation. There are evidences of lower percentage loss of apparent density for temperatures up to 450ºC, however the macrostructural evaluation did not indicate morphological differences between the materials.

Keywords: Ultra-High performance concretes, Reactive powder concrete, Spalling, Multi-walled Carbon Nanotubes, Resistance to elevated temperatures

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustrações de Grafeno (a), Nanotubos de parede simples (b) e Nanotubos de Paredes Múltiplas (c).....42
Figura 2 – Fluxograma do Programa Experimental.....50
Figura 3 – Fluxograma da Caracterização dos materiais.....51
Figura 4 – Curva traço CUAD versus curva-alvo do Modelo MA.....53
Figura 5 – Gráfico representativo do procedimento de Aquecimento Lento.....56
Figura 6 – Gráfico representativo do procedimento de Aquecimento Rápido.....57
Figura 7 – Ocorrência do fenômeno do *Spalling* - 30ºC a 300ºC.....60
Figura 8 – Ocorrência do fenômeno do *Spalling* - 30ºC a 450ºC.....61
Figura 9 – Ocorrência do fenômeno do *Spalling* - 30ºC a 600ºC.....62
Figura 10 – Ocorrência do fenômeno do *Spalling* – Aquecimento Lento.....62
Figura 11 – Resistência à compressão residual - 30ºC a 300ºC.....64
Figura 12 – Resistência à compressão residual - 30ºC a 450ºC.....64
Figura 13 – Resistência à compressão residual - 30ºC a 600ºC.....65
Figura 14 – Resistência à compressão residual– Aquecimento Lento.....65
Figura 15 – Perda de massa– Aquecimento Lento.....67
Figura 16 – Modificação de Densidade Aparente - 30ºC a 300ºC.....69
Figura 17 – Modificação de Densidade Aparente - 30ºC a 450ºC.....70
Figura 18 – Modificação de Densidade Aparente - 30ºC a 600ºC.....70
Figura 19 – Modificação de Densidade Picnométrica - 30ºC a 300ºC.....71
Figura 20 – Modificação de Densidade Picnométrica - 30ºC a 450ºC.....72
Figura 21 – Modificação de Densidade Picnométrica - 30ºC a 600ºC.....72
Figura 22 – Avaliação macroestrutural da superfície de ruptura - Aquecimento lento – Parte 1.....74
Figura 23 – Avaliação macroestrutural da superfície de ruptura - Aquecimento lento – Parte 2.....75
Figura 24 – Ocorrência do fenômeno do *Spalling* – Aquecimento rápido até 600ºC 76
Figura 25 – Resistência à compressão residual – Aquecimento rápido até 600ºC ..77
Figura 26 – Perda de Massa – Aquecimento rápido até 600ºC.....78
Figura 27 – Modificação de Densidade Aparente – Aquecimento rápido até 600ºC 79
Figura 28 – Modificação de Densidade Picnométrica – Aquecimento rápidoaté 600ºC.....80

Figura 29 – Avaliação macroestrutural da superfície de ruptura - Aquecimento rápido até 600ºC 81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Alcance das propriedades de CUAD 33
Tabela 2 – Caracterização básica dos materiais 52
Tabela 3 – Traço CUAD.....53

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Resumo de desenvolvimento e exemplos de aplicações históricas de CUAD 24

Quadro 2 - Versatilidade de aplicações atuais de CUAD ao redor do mundo 25

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Modelo de Furnas.....35
Equação 2 – Modelo de Andreassen.....35
Equação 3 – Modelo Modificado de Andreassen ou Modelo de Furnas.....36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas e Técnicas

CCA – Cinza da Casca de Arroz

CEFET-MG - Centro Federal de Educação Tecnológica-Minas Gerais

CPR – Concretos de Pós Reativos

CUAD – Concretos de Ultra-Alto Desempenho

CUADRF – Concretos de Ultra-Alto Desempenho Reforçado com Fibras

CV – Cinzas Volantes

DEC - Departamento de Engenharia Civil

EGAF – Escória Granulada de Alto Forno

MC – Metacaulim

NTC – Nanotubos de Carbono

NTCPM – Nanotubos de Carbono de Paredes Múltiplas

SP – Superplastificante

C-S-H – Silicato de Cálcio Hidratado

$Ca(OH)_2$ – Hidróxido de Cálcio

$CaCO_3$ – Carbonato de Cálcio

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 18

1.1 Justificativa 20

1.2 Objetivo 22

1.3 Escopo do trabalho 22

1.4 Limitações da pesquisa 22

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 24

2.1 Concretos de ultra-alto desempenho 24

2.1.1 Histórico e aplicações 24

2.1.2 Definições e conceitos 25

2.1.3 Materiais 27

2.1.4 Dosagem, produção e cura 31

2.1.5 Propriedades 33

2.2 Empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais. 34

2.2.1 Teoria e modelos 34

2.2.2 Modelo modificado de Andreassen 35

2.3 Comportamento de concretos de ultra-alto desempenho quando expostos a elevadas temperaturas 37

2.3.1 Parâmetros de desempenho de CUAD quando expostos a elevadas temperaturas 37

2.3.2 Formas de avaliação de desempenho de CUAD em elevadas temperaturas 38

2.4 Nanotubos de carbono 42

2.4.1 Definições e contextualização 42

2.4.2 Aplicações na construção civil 43

2.4.3 Métodos de dispersão de nanotubos de carbono em compósitos de cimento 44

2.4.4 Aplicações e efeitos em CUAD 46

2.4.5 Comportamento de compósitos de cimento reforçados com NTCs quando expostos a elevadas temperaturas....47

3 MATERIAIS E MÉTODOS 49

3.1 Programa experimental 49

3.2 Caracterização das matérias primas 51

3.3 Dosagem do traço através da teoria de empacotamento de partículas...52

3.4 Dispersão dos nanotubos de carbono de paredes multiplas 53

3.5 Moldagem dos corpos de prova 54

3.6 Procedimentos de submissão ao aquecimento 55

3.6.1 Aquecimento lento....55

3.6.2 Aquecimento rápido 56

3.7 Procedimentos de avaliação do comportamento do material 57

3.7.1 Spalling 57

3.7.2 Resistência à compressão residual....57

3.7.3 Densidade aparente 58

3.7.4 Densidade Picnométrica 58

3.7.5 Avaliação da macroestrutura....58

3.7.6 Perda de massa 58

4 RESULTADOS 60

4.1 Resultados após aquecimento lento....60

4.1.1 Spalling 60

4.1.2 Resistência à compressão residual....63

4.1.3 Perda de massa 67

4.1.4 Densidade aparente 68

4.1.5 Densidade picnométrica....71

4.1.6 Avaliação da macroestrutura....73

4.2 Resultados após aquecimento rápido 75

4.2.1 Spalling 75

4.2.2 Resistência à compressão residual....76

4.2.3 Perda de massa 78

4.2.4 Densidade aparente 79
4.2.5 Densidade picnométrica 80
4.2.6 Avaliação da macroestrutura 80

5 CONCLUSÕES 82

REFERÊNCIAS 84

ANEXOS 91

1 INTRODUÇÃO

Segundo Shi *et al.*(2015), as misturas de CUAD contam com combinações de materiais selecionados para atingir propriedades especiais (cimento, sílica ativa, escória de alto forno, cinzas volantes, metacaulim, pó de calcário, cinza das cascas de arroz, nanopartículas, agregados, superplastificantes, fibras, entre outros). Além disso são produzidas com baixo fator água/cimento (a/c). Valores típicos de a/c para os CUAD estão entre 0,14 e 0,20, o que demanda o uso de aditivos superplastificantes escolhidos cuidadosamente para cada mistura.

O uso de nanomateriais nas misturas de CUAD pode conduzir a uma microestrutura mais densa, melhores propriedades mecânicas e de durabilidade (ABBAS; NEHDI; SALEEM, 2016a). Nesse contexto, os NTCs vem sendo utilizados em misturas de CUAD (SHI *et al.*, 2015b).

Os NTCs, em razão de suas propriedades mecânicas superiores, são potenciais candidatos a agirem como nanorreforço na matriz de compósitos de cimento de ultra-alto desempenho. Nesse sentido, o método de dispersão é essencial, uma vez que a homogeneidade da dispersão contribui significativamente para as características dos CUAD e o comportamento aglomerante desses nanomateriais constitui um desafio (LIM *et al.*, 2015). Pesquisas recentes indicam que o uso de ultrassom para dispersão em questão, têm obtido bons resultados (ROCHA, 2018; MARCONDES *et al.*,2015).

Aspectos fundamentais para a produção dos CUAD devem ser observados, principalmente os métodos de dosagem, produção e cura utilizados. A dosagem é primordial, uma vez que visa a seleção de uma proporção ótima entre os materiais componentes do concreto de forma a garantir suas propriedades requeridas no estado fresco e endurecido. Dessa forma, muitas pesquisas envolvendo a produção de CUAD têm buscado obter a dosagem ideal através da utilização de modelos (SHI *et al.*, 2015b).

A literatura indica que um dos modelos de maior destaque é o Modelo de Empacotamento de Partículas Modificado de Andreassen e Andersen, que segundo Alkaysi e El-Tawil (2016) trabalha com a relação entre o volume sólido das partículas de um material e o volume total ocupado por esse material. Shi *et al.* (2015) acrescentam que o modelo estabelece uma curva-alvo de proporção entre os materiais, o que é feito considerando-se a distribuição do tamanho de suas

partículas. Feito isso, o modelo lança mão de um algoritmo de otimização baseado no método dos mínimos quadrados para ajustar a proporção de cada material na mistura até obter a melhor aproximação entre a curva-alvo e a mistura real pretendida.

Ainda segundo Shi *et al.* (2015), o processo de produção de CUAD geralmente não difere daquele utilizado para o concreto convencional na mistura, moldagem e vibração. Logicamente, há de se ressaltar que pode haver processos diferenciados de incorporação de materiais especiais, como os nanomateriais, processos inexistentes na produção de concreto convencional.

No que diz respeito à cura, algumas opções vêm sendo utilizadas, sendo possível a cura em autoclave, cura aquecida e à temperatura ambiente. No intuito de ampliar a utilização de CUAD e aproveitar ao máximo os benefícios de suas propriedades superiores, constata-se ser necessário aprofundar o conhecimento em torno do comportamento desse material inovador nas mais diversas situações às quais venha a ser exposto ao longo de sua vida útil. Para isso, um aspecto importante é o comportamento dos CUAD quando submetidos à elevadas temperaturas, já que as características mecânicas dos materiais se reduzem quando os mesmos passam por aquecimento (COSTA; SILVA, 2006) .

De acordo com Costa (2002), em situações em que há elevação de temperatura, como em um incêndio, pode ocorrer ruptura de elementos estruturais em razão de transformações microestruturais provenientes dessa elevação. Os CUAD são materiais que apresentam baixo fator água-cimento, elevada resistência e densidade, o que faz com que em situação de incêndio formem-se rachaduras na estrutura mais facilmente (YE *et al.*, 2012).

O fenômeno supracitado pode ser explicado pelo fato de que, em concretos com baixo fator água-cimento, a matriz se torna muito compacta, o que faz com que a expansão de volume de vapores proveniente do aquecimento, gere pressões internas. Diante disso, frequentemente ocorre um fenômeno denominado *spalling*, lascamento que ocorre de forma explosiva (COSTA; FIGUEIREDO; SILVA, 2002). Além desse fenômeno, é importante a avaliação de outros aspectos envolvendo o comportamento dos CUAD em elevadas temperaturas, como a perda de resistência mecânica, a perda de massa e os danos ocorridos após aquecimento.

Pesquisas indicam que a presença de NTCs na matriz de compósitos cimentícios pode modificar seu comportamento quando expostos a elevadas temperaturas. De acordo com Makar e Beaudoin (2004), a boa condutividade térmica desse material, pode ser útil no sentido de melhorar a resistência térmica de materiais compósitos. Nos trabalhos de Szelag (2017), ao expor pastas de cimento reforçadas com NTC a temperatura de 250ºC, observou-se que a presença do nanorreforço em questão aumentou a resistência à compressão residual.

Enfim, apresentadas as lacunas envolvendo o pleno entendimento do comportamento dos CUAD em elevadas temperaturas, bem como suas vantagens como um material de construção, cabe ressaltar a importância do desenvolvimento de pesquisas em torno do tema.

1.1 Justificativa

De acordo com Lu *et al.* (2016), cada vez mais os empreendimentos envolvem edifícios maiores e mais altos, nesse contexto o uso dos CUADs se mostra uma tendência inevitável. Dessa forma, faz-se necessário efetivo conhecimento das propriedades desses materiais. Segundo Abbas *et al.* (2016), os benefícios provenientes do uso dos CUAD ainda não são bem conhecidos, demonstrando que justificam-se pesquisas sobre os mesmos. Adicionalmente, Nazri *et al.* (2017) ressalta que, para que se consiga confiabilidade nas futuras substituições de materiais convencionais por CUAD, é primordial entender a resistência desse material quando em situações de elevadas temperaturas, como em um incêndio.

A tecnologia de CUAD não é nova, mas se comparada ao concreto, essa tecnologia de 20 anos de idade ainda é incipiente (PERRY; SEIBERT, 2013). Segundo Wang *et al.*(2012), em meio a esse cenário, é imediato constatar a importância de se avaliar as propriedades dos CUAD incorporados com nanomateriais. A adição de nanotubos de carbono aos concretos de cimento Portland merece atenção especial, já que apresenta benefícios promissores e constitui um campo com poucos resultados disponíveis na literatura (MARCONDES *et al.*, 2015).

Ainda que estudos venham sendo desenvolvidos no sentido de se entender o efeito da incorporação de NTCPM em pastas de cimento e argamassas, são raros os

estudos envolvendo os efeitos dos mesmos nas propriedades de concretos de ultra-alto desempenho (LU; OUYANG; XU, 2016). Quando se trata de comportamento térmico, apesar de existirem trabalhos avaliando os efeitos de NTCs em compósitos diversos, quando se trata de CUAD com matriz reforçada por NTCs, dificilmente são encontradas pesquisas que analisam esse aspecto.

A revisão da presente pesquisa não identificou nenhum trabalho que fizesse a avaliação de CUAD, cuja matriz tivesse sido reforçada com NTC quando expostos a elevadas temperaturas. Conforme mencionado, dadas as excelentes propriedades térmicas dos NTC, o assunto se faz relevante, uma vez que se espera modificação do comportamento em razão do reforço, já que sua influência já foi verificada em pastas e argamassas de cimento (YU; LAU, 2017; XIAO-YONG; LI-NA, 2016;ZHANG; KAI; LIEW, 2017;SZELAG, 2017;MORSY; ALSAYED; AQEL, 2011).

Segundo Naaman e Wille (2012), a utilização de carbono em nanoescala, assim como o uso do grafeno como reforço às misturas de CUAD representam tema de estudo importante para o avanço do desenvolvimento desse material e está em plena discussão na década de 2010 a 2020.

A aplicação de NTCPM em CUAD é atualmente uma área que demanda mais estudos (LU; OUYANG; XU, 2016). Ao desenvolver programa experimental envolvendo o estudo de corpos de prova de CUAD com incorporação de NTCPM em elevadas temperaturas, o presente trabalho poderá contribuir com informações importantes ao esclarecimento dessa lacuna no conhecimento.

Além dos aspectos comportamentais do material supracitados, há de se contribuir com temas que demandam de pesquisa, como a questão dos métodos de dispersão de NTCs em matrizes cimentícias. Sabe-se que para o sucesso do nanorreforço configurado pela incorporação dos NTCs às matrizes dos CUAD é crucial a eficiência do método de dispersão adotado. Segundo Rocha (2018), ainda existem questões envolvendo o assunto que não encontram-se completamente elucidadas e que portanto atraem pesquisadores e demandam de mais estudos, sendo a quantidade de nanomaterial dispersa efetivamente na matriz de cimento e a determinação de um método eficaz de dispersão.

Ao utilizar o método de dispersão de NTCPM não funcionalizados em suspensão não aquosa de isopropanol nas partículas de cimento, a presente pesquisa poderá contribuir com a questão complexa da efetividade do método de dispersão.

1.2 Objetivo

O objetivo principal do presente trabalho é a avaliação do comportamento de concretos de pós reativos, maior representante dos concretos de ultra-alto desempenho (CUAD), com incorporação de nanotubos de carbono de paredes múltiplas (NTCPM) quando submetidos a elevadas temperaturas. Como objetivos específicos pode-se citar:

- Avaliação da ocorrência do fenômeno do *spalling* (lascamento explosivo em razão da elevação da temperatura), da resistência à compressão residual, perda de massa, modificações de densidade e efeitos sobre a microestrutura de material submetido à aquecimento, tanto de forma lenta, quanto de forma rápida;
- Validação do método de dispersão dos NTCPM não funcionalizados em suspensão não aquosa de isopropanol nas partículas de cimento na produção de CUAD.

1.3 Escopo do trabalho

O presente trabalho consta da elaboração de pesquisa destinada a dissertação de mestrado a ser apresentada no Programa do Pós-graduação em Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG). A pesquisa envolvida conta com levantamento do estado da arte para identificação de lacuna no conhecimento, revisão bibliográfica e programa experimental destinado à investigação científica.

O escopo da citada dissertação de mestrado, constitui-se de (i) o presente capítulo introdutório, justificando a realização do trabalho e os objetivos almejados, (ii) uma revisão teórica apontando as pesquisas já realizadas mais relevantes ao tema abordado, (iii) os materiais utilizados e a metodologia aplicada, (iv) apresentação e análise dos resultados, (v) a conclusão final do trabalho de mestrado e (vi) as sugestões para trabalhos futuros.

1.4 Limitações da pesquisa

A presente pesquisa limita-se à análise do comportamento de corpos de prova de CPR com matriz cimentícia reforçada com dois percentuais específicos de nanotubos de carbono de paredes múltiplas (0,05% e 0,1% em peso). Avaliam-se aspectos comportamentais físicos, mecânicos e macroestruturais do material

submetido a elevadas temperaturas. O seu aspecto principal visa entender as modificações comportamentais provenientes da inserção do nanomaterial no traço selecionado. As principais limitações residem no método de dispersão, nos procedimentos experimentais e nas avaliações desenvolvidas. O método de dispersão utilizado consta de um procedimento próprio, elaborado com base em processo padronizado pela literatura, não sendo avaliados outros processos existentes de dispersão. A elevação de temperatura foi limitada a 600ºC, em razão da literatura indicar perdas muito significativas de resistência a partir dessa temperatura. A pesquisa limita-se também aos aspectos elencados nos objetivos, não sendo avaliados outros parâmetros, como resistência à tração residual, efeitos sobre propriedades térmicas e de deformação. Além disso, o processo limita-se à comparação antes e após aquecimento, não sendo avaliados parâmetros de desempenho quando em aquecimento, tampouco efeitos de choques térmicos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Concretos de ultra-alto desempenho

2.1.1 Histórico e aplicações

De acordo com Russel e Graybeal (2013), a formulação dos CUAD como se apresenta nos dias atuais é resultado de um processo de evolução que vem ocorrendo há muitos anos. Naaman e Wille (2012) explicitam que os avanços em torno dos CUAD são convergências de avanços em matrizes cimentícias, em fibras, nas ligações de interface entre fibras e matrizes e no compósito resultante.

Pesquisas envolvendo concretos com alto desempenho, já vinham sendo desenvolvidas desde a década de 1970 (NAAMAN e WILLE, 2012). Entretanto, Resplendido (2004) atribui a primazia dos trabalhos em Concretos de Pós Reativos (CPR), posteriormente chamados de CUAD por De Larrad em 1994, às pesquisas de Bouygues desenvolvidas entre 1990 e 1995. O desenvolvimento histórico do material ao longo das últimas décadas pode ser entendido através do Quadro 1.

Quadro 1 - Resumo de desenvolvimento e exemplos de aplicações históricas de CUAD

Período	Avanços	Exemplos / Aplicações
Década de 90	- Contribuições no melhoramento da matriz cimentícia e no reforço fibroso; Aplicação do conceito de alta densidade de empacotamento, adição de partículas finas, diminuição da porosidade, uso de menores fatores água/cimento (NAAMAN E WILLE, 2012).	- Primeira ponte construída utilizando CUAD no Canadá, 1997. desde então pelo menos 26 pontes foram construídas no país usando CUAD (RUSSE E GRAYBEAL, 2013). - Substituiu-se torres de resfriamento de vigas de aço nas usinas Cattenom (França) usando três tipos de CUAD comerciais (BSI, Ductal® e Civaux com BSI) (RESPLENDINO,2004).
Década de 2000	- Avanços no empacotamento de partículas e na aplicação de nanotecnologia no aprimoramento da matriz e no reforço por fibras (opções como o reforço por fibras de aço de ultra-alta resistência, nanofibras e nanotubos de carbono) (NAAMAN E WILLE, 2012). - CUAD tornam-se economicamente viáveis nos EUA (BEN GRAYBEAL, 2011).	Destaca-se uso em infraestrutura rodoviária, propriedades superiores favorecem o *retrofit* de elementos estruturais e em sobreposições e revestimentos (BEN GRAYBEAL, 2011). - Na França constroem as primeiras pontes rodoviárias feitas com CUAD, (*Bourg-lès-Valence*), com rodovias inteiramente em CUAD entre os apoios. Em Seul, Coréia do Sul, se constrói uma passarela em arco que mede 120 m (RESPLENDINO, 2004).
Década de 2010	- Pesquisas desvendam o comportamento da matriz em nanoescala e aprofundam o conhecimento no reforço com carbono também nessa escala (NAAMAN E WILLE, 2012).	- Ampla diversificação de uso em diversos países, desde a América do Norte até a Austrália, envolvendo superestruturas, pré-fabricados, pontes, entre outros (RUSSEL E GRAYBEAL, 2013).

Fonte: Elaborado pelo autor.

Russel e Graybeal (2013) trazem aplicações que vem ocorrendo na América do Norte, Europa, Asia e Austrália nos últimos anos, demonstrando a versatilidade do material. Essas aplicações estão resumidas no Quadro 2.

Quadro 2 - Versatilidade de aplicações atuais de CUAD ao redor do mundo

Continente	Países	Utilizações
América do Norte	EUA e Canadá	Articulações de painéis de convés, treliça espacial de pré-moldado pós-tensionado, articulações entre painéis pré-moldados e painéis conectores de cisalhamento, pré-moldados pós-tensionados em seção T, preenchimento articular entre feixes de caixa adjacentes e entre contenções pré-fabricadas, preenchimento articular entre painéis pré-fabricados adjacentes, conectores entre pilares, juntas longitudinais de conexão entre módulos de superestrutura.
Europa	França, Alemanha, Paises Baixos e Suiça	Estruturas como pontes em arco, vigas protendidas, treliças de espaços variáveis, sobreposição de deck de pontes, camadas e painéis de proteção de superfícies, pisos, reabilitação e alargamento de pontes, formação de camada de impermeabilização e reparos.
Oceania	Austrália	Vigas I pré-moldadas e em painéis de proteção sonora.
Ásia	Japão e Coréia do Sul	Vigas, vigas caixão, pré-moldados e em pontes estaiadas.

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de RUSSEL, G; GRAYBEAL, 2013

Outras possíveis aplicações de CUAD incluem estacas pré-moldadas de concreto, *retrofit* sísmico de pontes, sobreposições de ligas finas em plataformas de pontes, entre outras (BEN GRAYBEAL, 2011). Tutikian *et al.*(2011) relata ainda que nos EUA e na Europa utiliza-se CUAD também em decoração, monumentos, mobiliário, dentre outros usos.

2.1.2 Definições e conceitos

Os concretos de ultra-alto desempenho (CUAD) podem ser definidos como um material compósito cimentício, cujas propriedades mecânicas e de durabilidade são superiores aos concretos convencionais. Suas excelentes propriedades basicamente são resultado do desenvolvimento de uma matriz muito densa, além de uma melhor zona de transição entre matriz e agregados, o que reduz os defeitos na microestrutura, as micro trincas e os poros formados (ZADEH *et al.*,2008).

Há ainda um aspecto interessante em torno dos CUAD, segundo Abbas *et al.* (2016) os mesmos constituem material sustentável. Isso se deve à sua maior durabilidade e ao uso de menores quantidades de matérias primas (por dimensões inferiores às peças equivalentes em concreto convencional). Além disso, são aspectos importantes a possibilidade de incorporação de subprodutos como forma

de diminuição do uso de cimento e a maior facilidade na reciclagem (dadas suas elevadas resistências e durabilidade).

Cabe aqui ressaltar a importância dos concretos de pós reativos (CPR) dentro do contexto dos CUAD, sendo que muitas vezes a literatura inclusive trata-os como iguais. Os CPR são o tipo de CUAD mais estudado e utilizado, em que foram completamente eliminados os agregados graúdos na busca de resolver problemas provenientes dos mesmos, como a geração de vazios internos, eliminação da zona de transição e aumento da superfície do esqueleto granular. O tamanho médio de suas partículas é de 0,2 mm (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

No sentido de se obter a matriz supracitada, bem como suas características especiais, Shi *et al.* (2015) elenca uma série de princípios teóricos envolvidos com produção de CUAD, sendo a redução da porosidade, aprimoramento da homogeneidade, a melhoria da microestrutura e aumento da tenacidade. A redução da porosidade tem relação direta com a resistência do concreto, uma vez que em todos os modelos aceitos de relação entre essas grandezas, ocorre que, quanto menor a porosidade, maior a resistência. A obtenção dessa redução ocorre devido ao melhor empacotamento de partículas e da redução do fator água/cimento, através do uso de superplastificantes de alta performance.

O aprimoramento da homogeneidade é importante na medida em que reduz os problemas provenientes da heterogeneidade do concreto convencional, em que os agregados formam um esqueleto granular na pasta de cimento e sua dureza é maior que a da pasta. Esse melhoramento da homogeneidade é obtido através da eliminação do agregado graúdo, melhoria das propriedades da pasta e na redução da relação na taxa de agregado na matriz (RICHARD; CHEYREZY, 1995).

Um dos principais princípios envolvendo essa homogeneidade nos CPR, e que se aplica aos CUAD de maneira geral, reside no aumento da resistência do material através da criação de maior superfície específica. Ocorre que a distribuição das cargas incidentes se torna mais homogênea, diminuindo a concentração de tensões em eventual falha da microestrutura. Isso ocorre porque com as menores dimensões das partículas, os grãos de agregados finos não ficam em contato uns com os outros, prevenindo-se tensões e falhas, a superfície específica é maior, assim maior a reatividade química e as ligações secundárias pelas forças de van der Waals e

mais homogêneo e resistente se torna o material (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

A respeito da melhoria na microestrutura, nos CUAD a mesma se apresenta muito densa e uniforme devido a alguns efeitos fundamentais, como o empacotamento de partículas sólidas; a hidratação e reações pozolânicas em materiais cimentícios, além da melhoria da zona de transição interfacial entre agregados e matriz (SHI *et al.*, 2015a).

Segundo Ahlborn e Steinberg (2012), a tenacidade está relacionada à capacidade do material de absorver impactos provenientes do ambiente ou da ação humana e os CUAD apresentam elevados valores dessa propriedade por vezes obtidos através da inclusão de fibras de aço ou carbono, como ressaltado por Yang (2008), conforme citado por Shi *et al.* (2015).

2.1.3 Materiais

A seleção adequada de materiais é primordial para a obtenção da resistência pretendida na produção de CUAD. Nesse contexto, cabe ressaltar que a literatura indica uma série de traços capazes de atingir as características de CUAD, sendo que os materiais presentes nos mesmos variam bastante.

Nos trabalhos de Shi *et al.*(2015), elencam-se os materiais frequentemente utilizados na misturas de CUAD: cimento Portland, sílica ativa, escória granulada de alto forno, pó de escória de aciaria, cinzas volantes, metacaulim, pó de calcário, cinza das cascas de arroz, nanopartículas, agregados, superplastificantes e fibras, sendo de aço, carbono, polipropileno ou vidro.

No que se refere ao cimento, o ideal é a utilização de tipos mais puros, no Brasil essa característica poderia ser encontrada no tipo CP I, que basicamente é composto de clínquer e gesso, entretanto sua comercialização não tem expressividade no mercado. Dessa forma, o CP V ARI se apresenta como a melhor opção, por ser também um cimento com pouca ou nenhuma adição além de gesso. Uma questão importante a considerar é a finura elevada desse material, o que demanda água em excesso. O uso de outros tipos de cimento pode ser avaliado, entretanto de maneira geral, deve-se evitar cimentos com mais de 3% de aluminato tricálcico hidratado, pois esse libera calor de hidratação de forma rápida, podendo

prejudicar as propriedades dos CUAD, que apresentam elevado consumo relativo de cimento (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011) .

De acordo com Goldman e Bentur (1993), conforme citado por Justs *et al.*(2012), a sílica ativa, o metacaulim, as cinzas da casca de arroz e a nanossílica , assim como os demais materiais pozolânicos, apresentam um efeito duplo, de melhorar o empacotamento de partículas e de reagir quimicamente com o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$ – molécula cristalina de grande dimensão) formando ainda mais silicato de cálcio hidratado (C-S-H – estrutura química resistente).

A sílica ativa, um componente essencial para as mistura de CUAD, pode ser definida como um subproduto da atividade industrial de produção de ligas de ferro-silício, cujo diâmetro típico é de aproximadamente 0,2 micrômetros (SHI *et al.*, 2015b). Em razão de suas partículas apresentarem tamanhos reduzidos, sua área de superfície específica é consideravelmente maior, o que faz com que haja melhoria do empacotamento de densidade da matriz, tanto física quanto quimicamente (WILLE; NAMAN; PARRA-MONTESINOS, 2011).

Em seus trabalhos, Wille *et al.* (2011) apresentam a recomendação de que o percentual de sílica ativa deva ser de 25%, entretanto os valores apresentados pelo literatura variam consideravelmente, desde 20 a 35%, além disso pesquisas indicam que o percentual ideal está relacionado ao fator água/cimento, sendo quanto menor o fator água/cimento, menor a demanda por sílica ativa (SHI *et al.*, 2015b).

As misturas de CUAD contam com quantidade reduzida ou simplesmente não possuem agregado graúdo em sua composição (BEN GRAYBEAL, 2011). A literatura indica que poucas dosagens de CUAD contendo agregado graúdo já foram realizadas. Segundo Ma *et al.* (2004), os agregados utilizados em CPR, apresentam dimensão máxima de 1,0 mm; entretanto, em sua pesquisa utiliza basalto triturado com o tamanho de partícula de 2 a 5 mm como agregado graúdo e atinge resultados semelhantes àqueles encontrados em misturas sem a utilização do mesmo.

Tutikian *et al.*(2011), acrescentam que além de reduzida dimensão máxima, é importante que a granulometria permita um ótimo empacotamento entre as partículas, dado o uso de materiais muito finos nas misturas. Além disso, ressaltam as características que fazem do quartzo um ótimo agregado para CUAD por ser uma rocha de elevada dureza e resistência à compressão.

De acordo com Droll (2004), o uso de escória granulada de alto forno (EGAF) em CUAD resulta em melhor empacotamento de densidade e reduz os defeitos da microestrutura. Segundo Van e Ludwig (2012), o uso de EGAF em percentual de 20% traz ainda o benefício de melhorar a trabalhabilidade em traços com diferentes percentuais de superplastificante; seus trabalhos demonstram ainda que a proporção adequada de EGAF está relacionada à quantidade de superplastificante e que esse material pode ser associado a outros, como a cinza de casca de arroz (CCA) para formar uma dosagem otimizada.

As cinzas volantes (CV) podem ser entendidas como um subproduto das usinas de carvão com partículas muito finas em formato esférico (SHI *et al.*, 2015a). Trata-se de uma adição mineral de atividade pozolânica. Muitos trabalhos utilizam as CV como substituição parcial do cimento em traços de CPR e CUAD. As pesquisas desenvolvida por Yazici *et al.*(2008) e Yigiter *et al.*(2012), por exemplo, produziram CUAD com menores valores de cimento valendo-se dessa estratégia, substituindo cimento por CV e ou EGAF em proporções de 20,40 e 60%.

O Metacaulim (MC) é um material pozolânico ultrafino, obtido a partir da calcinação da Caulinita. Pesquisas indicam que sua incorporação aos CUAD como material substituto do cimento tem efeitos semelhantes àqueles apresentados pelas cinzas volantes, além disso, podem apresentar menor custo. Outras vantagens residem em seu fator estético, por ser branco esse material pode conferir melhor aparência ao produto final (TAFRAOUI *et al.*, 2009).

As cinzas da casca de arroz podem ser consideradas um agente importante nas misturas de CUAD dado seu efeito pozolânico e sua atuação como agente de cura interna. A CCA é capaz de absorver água, diminuindo a água livre na mistura e fornecer essa água em um segundo momento para continuidade de hidratações do cimento. Sua ação atrasa e desacelera a perda de umidade interna no material, melhorando sua resistência e diminuindo a retração autógena (VAN *et al.*, 2014).

As adições em escala nanométrica podem ser capazes de melhorar as propriedades, performance e durabilidade dos concretos. Metodologias para hibridação e enchimento de moléculas conduzem a uma manipulação da estrutura fundamental das pastas de cimento (SANCHEZ; SOBOLEV, 2010). Souza *et al.*(2015) desenvolveram argamassas nanoestruturadas com nanotubos de carbono e com isso obtiveram melhorias consideráveis em suas propriedades mecânicas.

As pesquisas de Korpa e Reinhard (2008) indicam que a utilização de nanomateriais pode acarretar na produção de CUAD com características ainda mais avançadas. Nesse contexto, cabe citar que estudos vem utilizando materiais como nanossílica, nano-$CaCO_3$, óxido de nanotitânio, nano-aço, nanotubos de carbono, entre outros no aprimoramento de CUAD através da promoção da hidratação do cimento, da densificação da microestrutura e da zona de transição, entre outros efeitos (SHI *et al.*, 2015b).

Sendo os CUAD produzidos com reduzido fator água cimento, em torno de 0,14 a 0,2, é imediato perceber a importância do uso de superplastificantes (SP) em sua composição (SHI *et al.*, 2015b). Tutikian *et al.* (2011) reforçam que o uso dos SP em sua taxa máxima tem ainda o efeito de propiciar a diminuição do fator de água/agregado, melhorando as propriedades mecânicas. Os autores alertam que é necessário determinar o ponto de saturação do SP, aquele em que a partir do qual não há mais função de plastificante, e verificar a compatibilidade entre o cimento e o SP.

Entre os SP mais eficientes e utilizados estão aqueles cuja base consiste em policarboxilatos com cerca de 40 a 45% de teor de sólidos (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011). Diversas pesquisas têm comprovado os efeitos do SP nos CUAD, Spiesz e Hunger (2017) relatam a importância dos SP no ajuste do tempo de mistura, já que devido a energia necessária à ativação, os CUAD demandam maiores tempos de mistura. Além disso os SP se mostram determinantes no ajuste da trabalhabilidade.

Em muitos casos os CUAD contam com fibras em sua composição, sua existência se justifica no sentido de trazer ductilidade e resistência a esforços de tração e flexão ao material (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011). O tipo mais comum de fibra utilizado em CUAD é a fibra de aço, cujo diâmetro é reduzido e a resistência é elevada (RUSSEL, G; GRAYBEAL, 2013). A literatura apresenta diversos percentuais de adição de fibras, como orientação, pode-se citar o percentual ideal de 2,5% apresentado por Wille *et al.*(2011).

Enquanto as fibras de aço e carbono podem promover melhor tenacidade e resistência, as fibras de polipropileno podem ser utilizadas no sentido de se melhorar o desempenho do material quando em situação de elevação de temperatura. Há

evidências de que a presença dessas fibras pode inclusive prevenir a ocorrência do *spalling* (XIONG E LIEW, 2015).

Naaman e Wille (2012) ao construírem sua cronologia acerca dos avanços tecnológicos na produção de CUAD, elencam fibras de aço de ultrarresistência, nanotubos de carbono, nanofibras de carbono e grafeno como tendências de pesquisa nos últimos anos.

2.1.4 Dosagem, produção e cura

Diversos processos podem ser utilizados para a produção de CUAD, Shi *et al.* (2015b) em sua revisão ressaltam que muitas pesquisas obtém bons resultados usando técnicas específicas e avançadas como misturadores à vácuo, semi-vácuo, aplicação de pressão durante e após a mistura. Entretanto, ressalta que essas tecnologias são muito caras para atender às demandas de produção em larga escala dos projetos de engenharia. Diante desse cenário, muitas vezes os CUAD podem ser produzidos, moldados e vibrados de maneira convencional, em usinas convencionais de concreto, o que aumenta seu potencial de utilização em usos mais comuns.

Spiesz e Hunger(2017) desenvolveram CUAD utilizando equipamento de usinas convencionais, o transporte foi feito por caminhões-betoneira e o lançamento e a cura também não foram modificados em relação ao concreto convencional. Desta forma, a produção ocorre da maneira mais simples possível, sem quaisquer tratamentos especiais e caros após lançamento. Faz-se aqui a ressalva de que o tempo de mistura deve ser ajustado considerando-se a quantidade de água e superplastificante presentes no traço.

Em pesquisa complementar, os mesmos autores avaliaram aspectos importantes de durabilidade (porosidade, testes de resistência ao congelamento e descongelamento, testes de carbonatação, de difusão e migração) de CUAD produzidos nas mesmas condições, ou seja, sem qualquer modificação em relação ao concreto convencional. Novamente, os resultados são promissores (SPIESZ; HUNGER, 2017a).

Pesquisas anteriores, como a de Camacho *et al.* (2012), corroboram com a possibilidade de produção de CUAD utilizando equipamento e cura convencionais a

despeito das técnicas complexas envolvendo misturadores intensivos, cura a vapor, entre outros aspectos especiais.

Graybeal (2011) reitera que as similaridades entre CUAD e o concreto convencional são suficientes para permitir que o processo de produção seja o mesmo, com algumas ressalvas. Em seus trabalhos, explicita que esses concretos especiais demandam de maior energia para sua produção, acarretando em maior tempo de mistura. Esse aspecto somado à ausência ou diminuição dos agregados graúdos, além do reduzido fator água/cimento, pode demandar modificações nos processos no sentido de evitar superaquecimento durante a mistura. Nesse sentido recomenda-se o uso de misturadores de alta energia ou a diminuição da temperatura substituindo água por gelo, o que permite a produção e transporte em equipamentos comuns.

A título de recomendação, encontra-se em Shi *et al.* (2015a) uma sequência proposta para a produção, sendo a mistura dos pós secos por aproximadamente 10 minutos, adição da água e do superplastificante em seguida, mistura por mais 5 a 10 minutos, então adição de fibras quando for o caso.

A cura dos CUAD, assim como nos demais materiais cimentícios, está diretamente ligada a fatores de temperatura e umidade. Propiciar uma temperatura adequada para que as reações químicas ocorram e evitar que a perda de água interna necessária à hidratação do cimento é primordial. Nesse sentido a selagem das peças ou a aplicação de elevada umidade durante a cura podem ser opções recomendadas (RUSSEL, G; GRAYBEAL, 2013).

Tutikian *et al.* (2011) informa que em geral, os procedimentos de cura de CUAD, em especial CPR, envolvem altas temperaturas e pressões no sentido de aumentar a reatividade de materiais finos e formar cristais que conferem resistência aos compostos. Diversos métodos de cura podem ser utilizados para a produção dos CUAD, como cura aquecida sob pressão atmosférica, cura em vapor aquecido de alta pressão (autoclave) e cura em temperatura ambiente (SHI *et al.*, 2015b).

As propriedades dos CUAD são afetadas diretamente pelo método de cura (GU *et al.*, 2016). Russel e Graybeal (2013) reconhecem que os métodos de cura mais complexos, envolvendo elevadas temperaturas e pressões não são práticos e a cura à temperatura ambiente produz CUAD com elevado potencial de aplicações.

2.1.5 Propriedades

Sabe-se que a principal vantagem dos CUAD reside em sua elevada resistência à compressão, resultando na criação de elementos estruturais menores e mais leves. Em razão da potencial utilização de CUAD em construção de edifícios e infraestrutura, é importante ter bem definidas suas propriedades como dados significativos para os projetos estruturais. É imediato constatar que não há parâmetros universais de propriedades de CUAD, entretanto as pesquisas permitem estabelecer alguns parâmetros aceitos por diversos pesquisadores, que servem como orientação (BAQERSAD; AMIR; MORTAZAVI, 2017).

Russel e Graybeal (2013) consideram que já existem informações publicadas em volume suficiente para se estabelecer uma gama de propriedades a serem consideradas em projetos estruturais. Essas propriedades estão relacionadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Alcance das propriedades de CUAD

Propriedade	Alcance
Resistência à compressão máxima	140 a 200 MPa
Resistência à tração máxima	6 a 10 MPa
Módulo de elasticidade	40 a 70 GPa
Coeficiente de Poisson	0,2
Coeficiente de Expansão Térmica	10 a 10 milionésimos/ºC
Coeficiente de fluência[1]	0,2 a 0,8
Fluência específica [1]	6 a 45 milionésimos/MPa
Retração Total [2]	Maior que 900 milionésimos

[1]Depende do método de cura e do carregamento / [2] Combinação de retração por secagem e retração autógena, depende do método de cura.

Fonte: RUSSEL, G; GRAYBEAL, 2013

Além das propriedades destacadas por Russel e Graybeal (2013), os estudos desenvolvidos por Baqersad *et al.* (2017) acrescentam informações acerca da densidade, a qual deve estar entre 2482 e 2563 kg/m³. Além disso, os trabalhos de (WANG *et al.*, 2015) demonstram que já se encontram pesquisas que desenvolveram CUAD com resistências à compressão de até 800 MPa.

Estudos recentes comprovam as propriedades superiores de CUAD em relação a concreto convencional no que diz respeito à resistência mecânica, ductilidade e durabilidade. Shafieifar *et al.* (2017), desenvolveram estudo comparativo em que encontraram resistência à compressão cerca de quatro vezes mais elevada, maior módulo de elasticidade, maior resistência à tração e maior ductilidade.

Segundo Graybeal (2011), por possuírem uma estrutura de poros descontínua, os CUAD apresentam entrada de líquidos consideravelmente reduzida, o que aumenta sua durabilidade, mesmo quando comparados aos concretos de alto desempenho.

2.2 Empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais

2.2.1 Teoria e modelos

Na busca de atingir propriedades demandadas nos estados fresco e endurecido, a dosagem dos concretos visa estabelecer uma proporção ótima entre os materiais utilizados no compósito. A dosagem dos CUAD busca nesse sentido a obtenção de uma matriz cimentícia compacta e densa, com boa trabalhabilidade e resistência. Um meio adequado para se obter a proporção desejada em questão e que tem sido amplamente utilizado em pesquisas envolvendo CUAD é o uso da Teoria do Empacotamento de Partículas, que baseia-se em uma distribuição ótima do tamanho das partículas dos materiais componentes do traço (SHI *et al.*, 2015a).

A Teoria do Empacotamento de Partículas baseia-se na busca da correta seleção da proporção e do tamanho adequado dos materiais particulados, de forma que os vazios são sistematicamente preenchidos por partículas cada vezes menores de forma sucessiva (OLIVEIRA *et al.*, 2018 *apud* OLIVEIRA, 2000).

Ainda segundo Oliveira *et al.*(2018), os modelos de empacotamento de partículas utilizam equações matemáticas para descrever como partículas de diferentes tamanhos irão interagir geometricamente. Para tanto, calculam a densidade de empacotamento teórica de uma mistura por meio da distribuição granulométrica e da densidade de empacotamento de um determinado grupo de partículas.

De acordo com Teixeira e Cordon (2013), os primeiros esforços no sentido de se modelar o empacotamento de partículas data de 1982, como os trabalhos de Féret. A partir desse ponto inicial, modelos de empacotamento vem sendo desenvolvidos no sentido de otimizar misturas de concretos (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009).

Segundo Castro e Pandolfelli (2009), duas abordagens básicas envolvem os modelos em questão: a primeira delas é a abordagem discreta, que considera as partículas individualmente, como o modelo de Furnas, conforme pode ser visto na Equação 1.

Equação 1 – Modelo de Furnas

$$CPFT(\%) = 100\left(\frac{D^{\log r} - D_S^{\log r}}{D_L^{\log r} - D_S^{\log r}}\right)$$

A segunda trata da abordagem contínua, que trata as partículas como distribuições contínuas, como o modelo de Andreassen, que pode ser observado na Equação 2.

Equação 2 – Modelo de Andreassen

$$CPFT(\%) = 100\left(\frac{D}{D_L}\right)^q$$

Em ambos os casos as variáveis são: CPFT é a porcentagem volumétrica de partículas menores que o diâmetro D, D_L é o diâmetro da maior partícula, D_S é o diâmetro da menor partícula, r é a razão entre o volume de partículas entre duas malhas de peneiras consecutivas e q é o módulo ou coeficiente de distribuição.

Considerando-se que os modelos de Furnas (1931) e Andreassen (1930) convergem para uma mesma curva, fazendo-se ajustes matemáticos no modelo de Furnas e introduzindo o conceito do tamanho mínimo de partículas (DS) na equação de Andreassen, propôs-se o modelo Modificado de Andreassen ou como também é conhecido, o modelo de Alfred, que será explorado no próximo subitem do presente trabalho (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009, *apud* OLIVERIA,2000). Segundo Oliveira (2000), conforme citado por Oliveira *et al.* (2018), o modelo de Andreassen modificado possui maior eficiência de empacotamento e é mais condizente com sistemas particulados reais e, portanto, tem papel de destaque na dosagem de concretos.

2.2.2 Modelo modificado de Andreassen

Sbia *et al.*(2017) considera que o Modelo Modificado de Andreassen (MA) é atualmente um dos modelos mais utilizados. Conforme supracitado, o MA é bastante indicado para a dosagem de concretos e sua equação está explicitada por meio da equação 3, seus usos no contexto da produção de CUAD serão explorados.

Equação 3 – Modelo Modificado de Andreassen ou Modelo de Furnas

$$CPFT(\%) = 100\left(\frac{D^q - D_S^q}{D_L^q - D_S^q}\right)$$

CPFT é a porcentagem volumétrica de partículas menores que o diâmetro D, D_L é o diâmetro da maior partícula, D_S é o diâmetro da menor partícula, r é a razão entre o volume de partículas entre duas malhas de peneiras consecutivas e q é o módulo ou coeficiente de distribuição. A máxima densidade de empacotamento acontece quando o valor de q é igual a 0,37, entretanto quando estão presentes partículas finas e grossas, esse valor pode não proporcionar fluidez adequada. Para melhores condições de escoamento recomenda-se valores menores que 0,30 (OLIVEIRA *et al.*, 2018 *apud* OLIVEIRA, 2000).

Diversos são os trabalhos com bons resultados para dosagem de CUAD através do MA. O modelo em questão tem demonstrado ser útil no desenvolvimento de pesquisas com objetivos diversos, atuando no fornecimento de um traço adequado de CUAD para análise.

Alkaysi e El-Tawil (2016) investigaram diversas dosagens de CUAD, variando seus materiais constituintes e avaliando os impactos sobre o custo e as propriedades do material. Em seus experimentos o MA mostrou-se eficiente em antecipar os efeitos esperados. Já Yu *et al.* (2014) fazem uso do MA para elaborar um esqueleto denso e homogêneo de CUAD, obtido com uma quantidade relativamente baixa de cimento (cerca de 440 kg / m3).

O MA foi também utilizado por Yu *et al.*(2015) para, através do uso eficiente de minerais, desenvolverem CUAD com menor impacto ambiental. Além das pesquisas citadas, o método em questão vem sendo utilizado também para produção e estudo de CUADRF (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014b).

Sbia *et al.*(2017) ao estudar métodos confiáveis de construção de estruturas de CUAD afirma que seus resultados indicam que o MA é uma ferramenta útil para a dosagem dos mesmos. Em seus trabalhos, os autores lançam mão de um *software* disponível destinado a otimizar a distribuição do tamanho de partículas para melhor empacotamento do material particulado chamado *EMMA Mix Analyser.*

O *software* em questão calcula a distribuição granulométrica da mistura através da distribuição e densidade de seus constituintes, dessa forma pode-se comparar a

curva simulada com uma curva-alvo descrita pelo modelo escolhido, que pode ser o modelo de Andrassen ou o MA (EMMA; DISTRIBUTION, [s.d.]).

2.3 Comportamento de concretos de ultra-alto desempenho quando expostos a elevadas temperaturas

2.3.1 Parâmetros de desempenho de CUAD quando expostos a elevadas temperaturas

O comportamento do concreto frente a elevadas temperaturas constitui fator preponderante no que concerne à segurança das estruturas, principalmente em situações de incêndio. Nesse sentido, diversos aspectos vêm sendo avaliados quanto ao comportamento de CPR em situações de elevadas temperaturas, como resistência à compressão, resistência à tração e flexão, módulo de elasticidade e relação tensão-deformação, condutividade térmica, calor específico, perda de massa e *spalling* (ABID *et al.*, 2017).

As estruturas de concreto perdem resistência e área resistente em razão da ocorrência do *spalling*, a preocupação com esses fenômenos em concretos de elevadas resistências é ainda maior em razão de sua microestrutura densa, que desenvolve pressões internas elevadas provenientes dos vapores que se formam em seu interior com o aquecimento. Em caso de estruturas de concreto armado, o *spalling* pode acarretar em exposição da armadura ao fogo, causando ainda mais uma etapa de comprometimento da estrutura (SILVA, 2014).

Diversos fatores são importantes para o estudo do comportamento dos CUAD em elevadas temperaturas. Encontram-se na literatura parâmetros que são amplamente pesquisados no sentido de trazer informações relevantes para projetistas de estruturas em que sejam utilizados esses materiais inovadores.

Em sua revisão Abid *et al.* (2017), elenca uma série de fatores importantes para a avaliação do comportamento dos CPR em elevada temperatura, sendo:

- Efeitos sobre as propriedades mecânicas: resistência à compressão, resistência à tração e flexão, módulo de elasticidade e relação tensão-deformação;

- Efeitos sobre as propriedades térmicas: condutividade térmica, calor específico, perda de massa;

- Efeitos sobre as propriedades de deformação: tensão térmica livre (expansão térmica), tensão térmica induzida pelo carregamento (fluência, deformação elástica e tensão transiente);

- *Spalling:* Ocorrência de lascamentos explosivos quando o material é submetido à elevação de temperatura.

Uma busca na literatura ratifica a listagem desenvolvida por Abid *et al.*(2017), os efeitos das elevadas temperaturas sobre a resistência mecânica, módulo de elasticidade, ocorrência de *spalling*, mudanças na estrutura química, são também ressaltadas por Pimienta *et al.*(2012). Além disso, Russel e Graybeal (2012) elencam também questões que inclusive já foram objeto de análise em publicações técnicas como resistência à tração, condutividade térmica, calor específico e coeficiente de expansão térmica para amostras submetidas a temperaturas entre 68 e 1112°F (20 e 600°C). A perda de massa é também um aspecto importante que vem sendo avaliado, como nos trabalhos de Way e Wille (2012). Tai *et al.*(2011) analisam ainda o módulo de Young.

A revisão da literatura indica também que diversos princípios adotados na produção do CUAD interferem diretamente em seus parâmetros de desempenho frente à elevadas temperaturas. Pesquisas recentes exploram a influência do tipo e do percentual de fibras, da taxa de aquecimento e das condições de cura na resistência residual de corpos de prova de CUAD (XIONG; LIEW, 2015). O teor de umidade das amostras na ocorrência do *spalling* e na resistência residual também se mostra importante para CUADRF (PENG; YANG, 2017).

Diversas são as constatações a respeito das modificações de propriedades e parâmetros de comportamento dos CUAD em elevadas temperaturas. Ao analisar trabalhos envolvendo pesquisas sobre o assunto, percebe-se que o método de dosagem, os materiais constituintes do traço, condições de cura, métodos utilizados para medição, entre outros aspectos, são de suma importância para os valores encontrados como resultados. Ainda assim, faz-se importante ressaltar valores de referências, mesmo considerando-se que existem peculiaridades inerentes à cada pesquisa.

2.3.2 Formas de avaliação de desempenho de CUAD em elevadas temperaturas

Por se tratar de material relativamente recente e considerando-se a vasta variabilidade de traços que podem compor CUAD, as formas de avaliar as propriedades do material por vezes não se encontram padronizadas de forma a oferecer um guia para mensurar parâmetros de desempenho do mesmo. A revisão

da literatura feita pelo presente trabalho indica que as pesquisas vêm sendo desenvolvidas com programas experimentais próprios, elaborados pelos pesquisadores no sentido de direcionar a avaliação ao aspecto desejado, seja de forma comparativa ou por meio de medições pontuais.

Faz-se importante obter informações presentes em pesquisas realizadas, ao passo que oferecem um caminho para futuras pesquisas ao estabelecerem as diretrizes de seu programa experimental.

Nesse contexto, são levantadas metodologias utilizadas por pesquisas bem-sucedidas, para que forneçam direções importantes para o sucesso de novas análises. Na busca de informações sobre as faixas de aquecimento, levanta-se a pesquisa desenvolvida por Abid *et al.* (2017), que resulta em conclusões interessantes sobre as propriedades dos CPR quando submetidos à elevadas temperaturas. Em relação à resistência, suas observações conduzem ao estabelecimento de três intervalos em que o comportamento se modifica: até 350°C, observa-se aumento na resistência; entre 350°C e 800°C ocorre queda acentuada e acima de 800°C, toda a resistência é perdida.

Zheng *et al.* (2013) em sua pesquisa encontrou indícios de que a resistência à compressão diminui a 100°C, aumenta a temperaturas de 200°C a 500°C e diminui a temperaturas acima de 600° C. Essas faixas de valores diferenciam-se em razão da presença de reforços fibrosos.

Tai *et al.* (2011) encontrou resultados experimentais que indicam que a resistência à compressão residual de CPR após aquecimento de 200°C a 300°C aumenta, mas diminui significativamente quando a temperatura excede 300°C. Nos estudos de Choe *et al.* (2015), verificou-se que em condições sem carregamento, a 100°C, houve deterioração da resistência de 30% e 40% respectivamente em corpos de prova de 150 e 200 MPa. A 200°C percebeu-se aumento da resistência à compressão e, para temperatura acima de 200°C, a mesma diminui com o aquecimento.

Ju *et al.* (2011) avaliou as propriedades termo-físicas de CPR, em relação à condutividade térmica, difusividade térmica e coeficiente de expansão linear, os valores diminuem para CPR em temperaturas elevadas em relação aos valores apresentados para quando em temperatura ambiente, entretanto o calor específico aumenta com o aumento da temperatura. Quando a temperatura é superior a 150°C,

a diminuição da condutividade térmica e difusividade térmica é mais acentuada. Os resultados mostram que a condução de calor e a capacidade de difusão do CPR se deterioram com o aumento temperatura. Já a capacidade de armazenamento de calor é melhorada e a deformação devido à expansão térmica torna-se menor.

De acordo com Ju *et al.* (2011), a perda de massa de CPR aumenta com o aumento da temperatura, ainda que a perda absoluta seja relativamente pequena. Encontram-se valores de perda de massa menores que 1% para temperaturas de até 250°C. Ao estabilizar a temperatura, a perda aumenta com o tempo e quando a temperatura é superior a 150°C, o teor de fibras faz-se importante, sendo que quanto maior o teor, maior a perda. Quando o aquecimento ocorre a uma taxa constante, quanto maior o teor de aço e fibra, menor a perda. Enfim, a perda de massa parece estar associada sobretudo ao o método de aquecimento e à quantidade de fibras.

No que diz respeito ao *spalling*, fenômeno de grande importância na avaliação do comportamento de CUAD em elevadas temperaturas, diversas pesquisas fornecem dados sobre sua ocorrência. Como já se espera, a temperatura crítica para ocorrência de *spalling* diminui conforme aumenta a resistência à compressão para os CPR. Além disso, a adição de fibras, como as de polipropileno e de aço, podem aumentar a resistência ao fenômeno em questão (ABID *et al.*, 2017).

As pesquisas de Xiong e Liew (2015) indicam que não houve *spalling* em corpos de prova de CUAD com fibras de polipropileno (em diferentes percentuais), mas aqueles reforçados com fibras de aço (mesmo a uma proporção de 1,0%) explodiram a uma temperatura de aproximadamente 490°C. No entanto, Zheng *et al.*(2013) afirma que a ocorrência do fenômeno do *spalling*, ocorre em temperaturas de 260°C a 520°C e indica que o percentual de 2% de fibras de aço pode prevenir o fenômeno. Liu e Huang (2009) desenvolveram traços de CPR em que não foi observado *spalling* até que se atingiu a temperatura de 790°C.

Além das faixas de aquecimento, é primordial também a definição de um programa experimental suficientemente preciso e direcionado à avaliação dos critérios desejados. Nesse sentido, em sua pesquisa Liu e Huang (2009) avaliaram a resistência, *spalling* e a perda de massa de CPR em comparação com concreto de alto desempenho (CAD) e com concreto convencional (CC). A pesquisa em questão apresentou dois programas de aquecimento diferenciados. Em um primeiro

momento, corpos de prova cilíndricos de 7,5 cm de diâmetro e 15 cm de altura foram equipados com termopares e avaliados sob uma temperatura constante de 500°C (com variações positivas ou negativas de 50°C) por cinco durações diferentes (0, 30, 60, 90 e 120 minutos). Em um segundo momento, corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm também equipados com termopares foram submetidos à aquecimento segundo a curva padronizada de aquecimento JIS A1304.

Os trabalhos de Canbaz (2014) avaliaram a estrutura física e a resistência residual de cubos de CUAD de 7x7x7 cm^3 submetidos a temperaturas de 20, 100, 400, 700 e 900°C por 3 horas. A taxa de aquecimento utilizada foi de 10°C/minuto.

Em suas investigações acerca da resistência a fogo, Nazri *et al.*(2017) submete corpos de prova de diferentes dimensões às temperaturas de 200,400 e 600°C por duas horas. Lee *et al.* (2017) ao investigarem a microestrutura de aluminato de cálcio em CUAD expostos a elevadas temperaturas expõem o material a temperaturas de 450°C e 800°C com uma taxa de aquecimento de 10°C/minuto.

Ye *et al.* (2012) desenvolvem um programa experimental diferenciado para a avaliação da resistência ao fogo de CUAD. Em sua pesquisa os autores submeteram corpos de prova sob pressão a temperaturas de 200, 300 e 400°C através do uso de uma jaqueta de aquecimento, que leva cerca de 20 a 30 minutos para atingir a temperatura-alvo, que então é mantida por cerca de 40 minutos.

A pesquisa de Choe *et al.* (2015), avaliou a resistência à compressão residual de corpos de prova cilíndricos de com diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm à uma taxa de aquecimento de 1°C/min até que se atingissem as temperaturas de 100, 200, 300, 500 e 700°C. Em seu trabalho, os autores também avaliam a ocorrência do *spalling* por observação e por perda de massa, entretanto para esse fim, utilizam a curva padronizada de incêndio ISO 834 até que se atinja a temperatura de 900°C.

Xiong e Liew (2015) avaliaram o desempenho de CUAD reforçados com diferentes tipos e teores de fibras quanto à ocorrência do fenômeno do *spalling*. Em seu programa experimental, os autores submetem corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm à uma taxa de aquecimento de 5°C/min até que se atinja 800°C então, mantém essa temperatura por 4 horas e observam se houve ocorrência.

2.4 Nanotubos de carbono

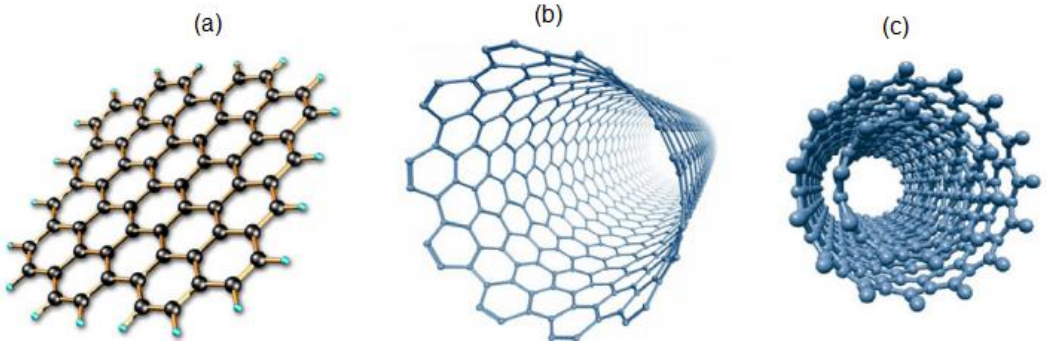
2.4.1 Definições e contextualização

Os nanotubos de carbono (NTCs) podem ser definidos como uma forma alotrópica de átomos de carbono sob a forma de folha de grafeno, que apresentam arranjo hexagonal (SOUZA *et al.*,2015). A primeira descoberta sobre NTC é atribuída à *Sujio Iijima*, no ano de 1991, em que observou duas ou mais folhas de grafeno em forma cilíndrica arranjadas de forma concêntrica, o que o pesquisador chamou de Nanotubos de Carbono de Paredes Múltiplas (NTCPM). O diâmetro externo desses microtubos de carbono grafítico situava-se na faixa de 4 a 30 nanômetros ao passo que o diâmetro do tubo mais interno apresentava dimensões próximas a 2,2 nanômetros (IIJIMA, 2002).

Em 1993, foi relatada a primeira produção de nanotubos de carbono feitos a partir de uma única folha de grafeno formando um cilindro, os chamados Nanotubos de Carbono de Parede Simples. Os diâmetros das estruturas em questão encontram-se nas proximidades de 0,4 a 3 nanômetros. Sua estrutura única de arranjo hexagonal cristalino conduz a propriedades especiais como resistência superior a do Ferro, densidade menor que a do Alumínio e estabilidade térmica a 1400 graus centígrados (IIJIMA, 2002).

A Figura 1 representa a estrutura do grafeno e dos NTCPS e NTCPM.

Figura 1 - Ilustrações de Grafeno (a), Nanotubos de parede simples (b) e Nanotubos de Paredes Múltiplas (c)



Fonte: Adaptado de ZARBIN; OLIVEIRA (2013)

Khitab e Arshad (2014) consideram os NTC como sendo os materiais mais resistentes, apresentam módulo de elasticidade de 1,8 TetraPascal, resistência à tração de 63 GPa e densidade de 1,4 g/cm³. O módulo de Young dos NTC é tão elevado quanto o do grafite e pode ser ainda maior quando se trata de NTPS;

adicionalmente, foram comprovadas experimentalmente as excelentes propriedades dos mesmos, como elevada resistência mecânica, flexibilidade extraordinária e resiliência, que podem refletir nos compósitos aos quais forem adicionados (SALVETAT; BONARD; THOMSON, 1999)

Segundo Aqel *et al.* (2012) as aplicações de NTC são diversas como em biotecnologia, farmácia, eletrônica, ferramentas científicas, processo da indústria manufatureira e o desenvolvimento de materiais avançados, entre outras. Além disso, indica que os NTC são parte de uma nova classe de materiais revolucionários com dimensões da ordem de 100 nm ou menos.

2.4.2 Aplicações na construção civil

Na área de materiais de construção civil, os projetistas estão interessados principalmente em resistência e densidade; na maioria das vezes, elevadas resistências estão associadas a altas densidades, o que pode não ser desejável em razão do aumento do peso próprio das estruturas. O grafeno apresenta elevado potencial de se tornar um importante material de construção por sua elevada resistência e baixa densidade (KHITAB; ARSHAD, 2014).

Encontram-se na literatura diversas aplicações dos NTC em materiais de construção, seus usos vão desde o aprimoramento de tintas destinadas a proteção de superfícies, com durabilidade de 25 anos, até cabos de potes estaiadas (KHITAB; ARSHAD, 2014). Diversas pesquisas vêm adicionando NTC em compósitos de cimento, um uso bastante explorado é a melhoria das propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos.

Estudos indicam que a incorporação de NTC em compósitos de cimento implica em melhoria das propriedades do material, com aumento na resistência a compressão e flexão (CRUZ, LADEIRA e LUDVIG, 2016; SANCHEZ e SOBOLEV, 2010; BATISTON, 2007) . Além disso, compósitos de cimento podem ver suas propriedades de resistência ao fogo melhoradas por herdarem propriedades de NTC quando os mesmos são adicionados à suas matrizes, através dos nanocimentos (GANESH, 2013).

Nas pesquisas de Kowald e Trettin (2009), os resultados indicam que os NTCPM influenciam na hidratação e na microestrutura do compósito de cimento e conduzem a melhores propriedades mecânicas. A pesquisa desenvolvida por Paula (2014)

demonstra serem as pastas de cimento com NTC uma opção viável para utilização em poços de petróleo, seus experimentos encontraram ganhos relevantes na resistência à compressão e na resistência à tração, avaliada por meio de ensaios de resistência à compressão diametral.

A análise da imagem em escala nanométrica das superfícies de fratura de nanocompósitos de cimento mostrou que os NTCs reforçam a pasta de cimento unindo as nanotrincas e os poros. Além disso, os resultados de nanoindentação sugerem que os NTCs modificam e reforçam a nanoestrutura da pasta de cimento, aumentando a quantidade de C-S-H e reduzindo a porosidade (METAXA *et al.*,2009).

Em sua revisão, Khitab e Arshad (2014) ressaltam o trabalho de Konsta-Gdoutos *et al.* (2010) em que se comprova que NTC preenchem mais efetivamente os espaços dos poros do concreto. Segundo os autores, a adição de NTC pode fazer com que o concreto se torne impenetrável à água e sais, o que potencializa sua durabilidade.

2.4.3 Métodos de dispersão de nanotubos de carbono em compósitos de cimento

Segundo Ludvig (2012), a adequada dispersão dos NTC constitui fator chave para a criação de compósitos de cimento reforçados com tais nanopartículas, além disso sua ligação com a matriz também se apresenta primordial. Silva (2017) afirma que para que se possa perceber melhorias nas propriedades do nanocompósito é necessário garantir a dispersão homogênea do reforço na respectiva matriz, assim como uma boa adesão entre o reforço e a matriz.

A razão da necessidade de métodos direcionados ao tratamento dos NTC na formação de nanocompósitos encontra-se na própria natureza dos NTC, uma vez que os NTC primitivos apresentam características como a hidrofobia, baixa reatividade e alta tendência a aglomeração, devido a atração das forças de Van der Waals (LUDVIG, 2012). Nesse contexto, faz-se importante conceituar o processo de dispersão, que pode ser entendido como a desaglomeração e subsequente distribuição de nanomateriais nas matrizes (ALSHAREF; TAHA; KHAN, 2017) .

Silva (2017) cita como métodos mais utilizados o uso de ultrassom e agitadores mecânicos. Alsharef *et al.* (2017) adicionalmente enumera diversos métodos categorizados genericamente como químicos ou físicos. Como exemplos de

processos químicos podemos citar o uso de solventes, surfactantes, polímeros, entre outros. Quando se trata de processos físicos o autor reforça a ideia do uso da energia ultrassônica ao apresentar diversas pesquisas que utilizaram esse método, faz também menção ao uso de misturadores de alta energia.

Cabe aqui ressaltar também o conceito de funcionalização, definido por Ludvig (2012) como uma preparação para o uso. O processo em questão visa manter a dispersão estável e pode inclusive promover fortalecimento da ligação entre os NTC e a matriz, para tanto, introduzem modificações superficiais nas nanopartículas, podendo ocorrer por meio de processos químicos ou físicos (SILVA, 2017). Por outro lado, na pesquisa desenvolvida por Batiston (2012), os processos de funcionalização ainda que tenham alterado as características dos NTC, não colaboraram com sua dispersão e nem na interação com a matriz de cimento.

Uma técnica que têm apresentado bons resultados na dispersão de NTC é o uso de dispersão prévia dos NTCs em meio não aquoso de isopropanol com sonicação (uso de energia de ondas sonoras). Sanchez e Sobolev (2010) explicitam que os trabalhos de Makar *et al.* (2005) foram os primeiros a verificar a influência dos NTCs sobre a hidratação do cimento e a formação de ligações fortes com a pasta. A dispersão com sonicação em isopropanol, foi seguida de adição de cimento, evaporação e moagem, o que produziu partículas de cimento revestidas com NTCs.

Resultados encontrados por Rocha (2018) indicam que o método de dispersão dos NTCs em partículas de cimento em solução de isopropanol e sonicação é bastante promissor, apresentando ganhos em resistência e aumento na energia de fratura. Esses resultados corroboram com aqueles encontrados por Marcondes *et al.* (2015), uma vez que em sua pesquisa envolvendo incorporação de NTCs a concretos de cimento Portland verificou-se que houve potencialização do efeito dessa incorporação em todos os casos em que foi feito o processo de dispersão prévia utilizando-se ultrassom. Ressalta-se aqui a importância de pesquisas na avaliação desses métodos de dispersão.

Pesquisas recentes descobriram que a dispersão de nanopartículas de grafeno de muticamadas com isopropanol evita que os flocos se aglomerem de forma elevada (SILVA *et al.*, 2017). Dentre outros fatores, o tempo de duração da sonicação é considerado de grande relevância para o resultado final da dispersão de CNTs (ALSHAREF; TAHA; KHAN, 2017).

Alsharef *et al.* (2017) reforça que o tempo de sonicação deve ser controlado para melhor dispersão e dano mínimo às nanopartículas. Os trabalhos de Rocha (2018) indicam que o tempo de duas horas pode ser adequado para se obter bons resultados dispersando-se NTCPM não funcionalizados em solução de isopropanol nas partículas de cimento. Em uma proporção ótima de 0,05% de NTC sobre o peso de cimento, os resultados com o citado método de dispersão são animadores, encontram-se ganhos de resistência mecânica da ordem de 50% e de energia de fratura de 70%.

2.4.4 Aplicações e efeitos em CUAD

Wille e Loh (2010) escolheram NTCPM como reforço em escala nanomética para CUAD em razão de suas propriedades mecânicas e físicas únicas (resistência, rigidez e ductilidade). De acordo com Lim *et al.* (2018), os NTC são considerados como um material com potencial para serem nanorreforço nas matrizes de CUAD, no sentido de criar um compósito de ultraperformance mais denso e mais dúctil.

Os percentuais típicos de incorporação de NTCs às matrizes cimentícias encontrados em pesquisas são de até 1% em peso, estudos realizados por Lu *et al.*(2016) indicam que a incorporação de NTCPM a CUAD em uma proporção ótima de 0,05% sobre o peso de cimento acarreta em aumento da resistência à compressão, diminuição do coeficiente de difusão de cloretos, melhora na resistência à flexão e na flexibilidade (LU; OUYANG; XU, 2016).

O uso de NTC e nanofibras pode propiciar aos CUAD melhorias em suas propriedades, o uso de nanomateriais nos CUAD pode fazer com que a microestrutura seja mais densa e assim, não somente suas propriedades mecânicas melhoram, mas também sua durabilidade (ABBAS; NEHDI; SALEEM, 2016b).

A pesquisa de Lu *et al.* (2016) indica que houve melhoria nas propriedades mecânicas de CUAD quando aplicou-se a porcentagem ótima de NTPMs (0,05% sobre o peso de cimento). A resistência à compressão aos 28 dias do CUAD contendo esse percentual aumentou em cerca de 5%, adicionalmente a incorporação aumentou significativamente a resistência à flexão e capacidade de deformação do material. Obteve-se ainda ganhos significativos na resistência à penetração de cloretos, o coeficiente de difusão de cloretos decresceu em 24%. A

observação da microestrutura indica que os NTCs agem como pontes nas microfissuras, garantindo a transferência de tensões.

De acordo com Shah *et al.* (2012), a adição de NTC ao concreto pode introduzir piezorresistividade ao material, fazendo com que o mesmo se torne autossensível (material que sente sua própria condição), aumentando a segurança das estruturas.

Shi *et al.* (2015a) reforçam a importância da efetividade da dispersão das nanopartículas no concreto para que sejam observados os benefícios esperados. Além disso, existem potenciais benefícios provenientes da aplicação dos NTCs em CUAD relacionados ao seu comportamento em elevadas temperaturas, esses aspectos serão explorados em 2.4.5.

2.4.5 Comportamento de compósitos de cimento reforçados com NTCs quando expostos a elevadas temperaturas

Segundo Yu e Lau (2017), os estudos envolvendo concretos reforçados com NTCs expostos a elevadas temperaturas são limitados, o que faz com que seja necessário recorrer a estudos assemelhados para entender os fenômenos e as variáveis envolvidas. Nesse sentido, a presente pesquisa levanta aspectos importantes envolvendo compósitos cimentícios reforçados com NTCs dada sua similaridade com os CUAD nanorreforçados com NTC, considerando inclusive a carência de estudos específicos já mencionada anteriormente.

Na pesquisa desenvolvida por Amin *et al.* (2015), ao avaliar a presença de NTCs em compósitos de cimento fabricados com argila de resíduo de tijolos de barro, encontraram-se resultados positivos no que diz respeito a resistência ao fogo. Os exemplares submetidos a temperaturas de 300, 600 e 800ºC por 3 horas apresentaram melhores resultados com a presença dos NTCs.

Constatou-se que com a adição de 0,1% de NTCs, foi possível aumentar a resistência às elevadas temperaturas através da avaliação da resistência à compressão residual, que em alguns casos chegou a ser cerca de 20% maior. Isso ocorre em razão de um efeito físico na mistura, já que preenche ainda mais os poros entre os produtos de hidratação e atua como pontes entre silicatos hidratados e através de rachaduras. Cabe aqui ressaltar que existe similaridade entre o compósito cimentício desenvolvido pela pesquisa de Amin *et al.* (2015) e os CUAD, uma vez que o resíduo utilizado é rico em sílica (76,9%), também bastante presente em traços de CUAD e utiliza fator água-cimento relativamente baixo (0,30).

Ao avaliar concretos reforçados com NTC expostos a elevadas temperaturas, Yu e Lau (2017) verificaram importantes aspectos de seu comportamento, sendo observado, por exemplo, que a inclusão é termicamente estável. Os pesquisadores constataram que a adição de NTCs pode melhorar a resistência à tração do material em escala nanométrica, de forma a conferir maior resistência ao fenômeno do *spalling* quando submetidos a temperaturas elevadas. Ressalta-se ainda a possibilidade de melhoria na questão da inflamabilidade, já que os NTC podem vir a agir como uma espécie de proteção que diminui a velocidade da degradação térmica do material.

Apesar desses benefícios, há uma questão importante alvo de melhoria para a utilização dos NTC em compósitos cimentícios em altas temperaturas, trata-se do risco do desprendimento dos NTC quando da ocorrência de um incêndio, que pode ocorrer dadas suas dimensões muito pequenas. Uma vez desprendidas, podem ser acidentalmente respiradas por pessoas e assim causar danos à saúde humana. Um caminho para a solução do problema citado pode estar na produção dos NTC, que pode direcionar para um perfeito encapsulamento das partículas quando inseridas no concreto (YU; LAU, 2017).

O trabalho desenvolvido por Szelag (2017) ratifica a melhoria na resistência à compressão residual em compósitos de cimento reforçados com NTC, ao avaliar pastas de cimento. Entretanto há ainda outros aspectos interessantes dessa pesquisa, como a avaliação das modificações na densidade aparente, na retração linear e na fragilidade do material após aquecimento.

No que diz respeito à densidade aparente, após o aquecimento, a redução no valor dessa propriedade conferida pela presença dos NTC (de aproximadamente 31%) se mantém. Dessa forma, entende-se não haver prejuízo do benefício em razão do aquecimento. Já o efeito sobre a retração linear se mostra bastante elevado, já que quando ocorre o aquecimento a propriedade aumenta em até cerca de 170% (SZELAG, 2017).

A fragilidade do material também foi apurada antes e após a carga térmica ser aplicada, os resultados são animadores, ao revelarem que o aquecimento não introduz modificações na melhoria promovida pelos NTC. Nos experimentos envolvendo a pesquisa, obteve-se melhoria de até 77%, mantida após o aquecimento (SZELAG, 2017).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Programa experimental

O programa experimental da presente pesquisa consiste na obtenção de um traço de CUAD, incorporação de NTCPM em sua composição, submissão do material a elevadas temperaturas e verificação das modificações comportamentais introduzidas por essa incorporação. Nesse sentido, os procedimentos foram executados segundo a seguinte sequência:

- Caracterização dos materiais: medição de densidade e curva granulométrica completa dos materiais, na busca de informações necessárias para a dosagem;

- Obtenção do traço: utilização da Teoria do Empacotamento de Partículas para formulação de um traço de CUAD;

- Dispersão dos NTC: aplicação de procedimento para dispersão dos NTC não funcionalizados em suspensão não aquosa de isopropanol nas partículas de cimento de forma adequada para a preparação de CUAD utilizando a incorporação em percentuais de 0,05% e 0,1% de NTC sobre o peso de cimento;

- Moldagem: produção de 84 corpos de prova cilíndricos com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, sendo 28 unidades de cada composição (referência, 0,05%NTC e 0,1%NTC) destinados à avaliação posterior submissão a aquecimento rápido e lento, em diferentes faixas de temperatura;

- Avaliação de CPs de referência: obtenção de parâmetros de resistência à compressão, densidade aparente, densidade picnométrica e microestrutura de corpos de prova sem submissão a elevação de temperatura;

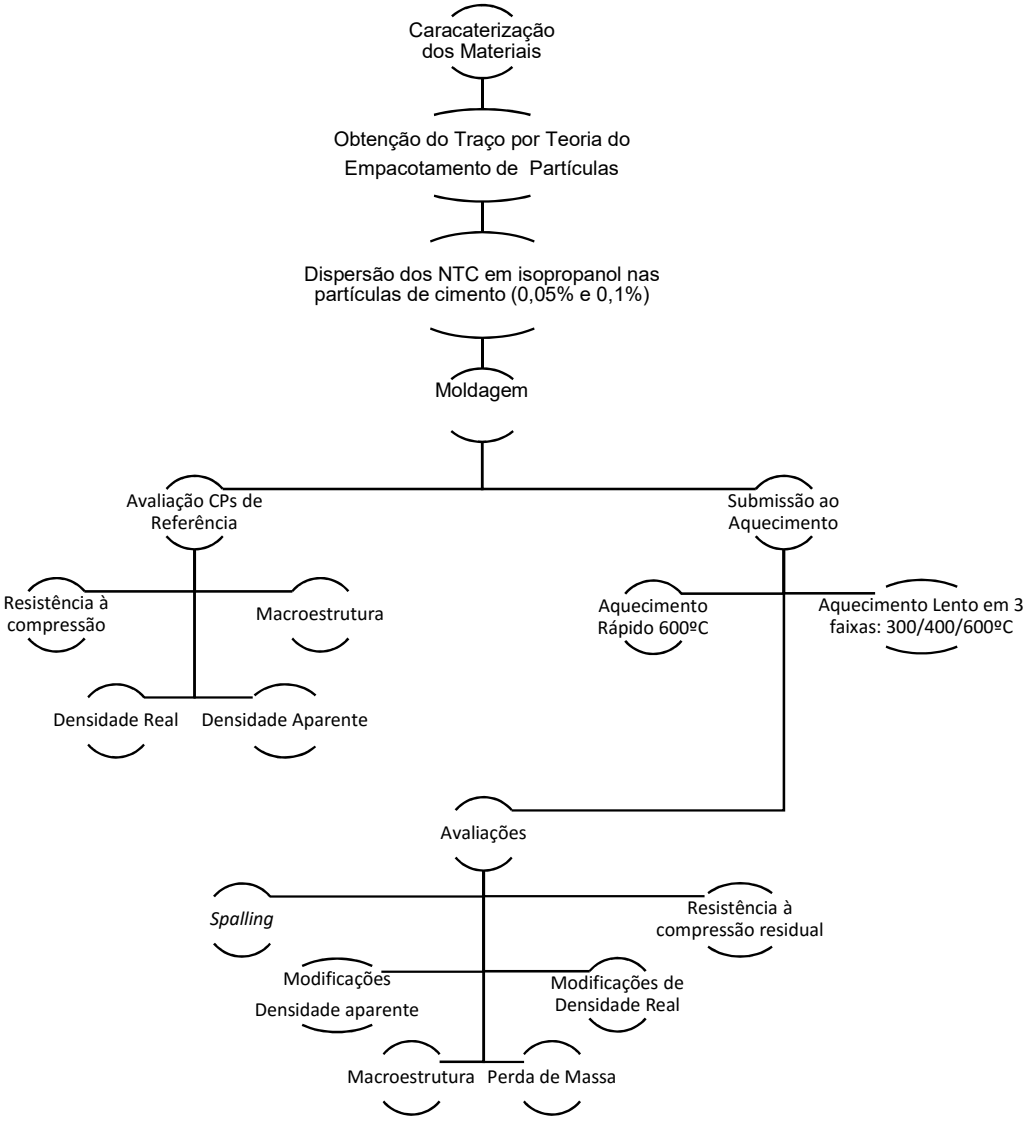
- Submissão ao aquecimento lento: submissão de corpos de prova a uma taxa de aquecimento reduzida (2ºC/min), sendo executado em três faixas para avaliação das modificações comportamentais até 300ºC, 450ºC e 600ºC, tendo ocorrido resfriamento lento a uma taxa de 0,6ºC/min;

- Submissão ao aquecimento rápido: submissão de corpos de prova a uma taxa de aquecimento elevada (9ºC/min), atingindo a temperatura máxima de 600ºC, tendo ocorrido resfriamento lento a uma taxa de 0,6ºC/min;

- Avaliações após aquecimento: verificação de parâmetros importantes no que diz respeito ao comportamento de CUAD quando em elevadas temperaturas, como ocorrência do fenômeno do *Spalling*, resistência à compressão residual, perda de massa, modificações sobre sua densidade e macroestrutura.

O programa experimental descrito pode ser resumido pelo fluxograma presente na figura 2.

Figura 2 – Fluxograma do Programa Experimental



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 Caracterização das matérias primas

Através da revisão na literatura e da realização de testes preliminares, elencaram-se os materiais componentes do traço a ser utilizado: Cimento CPV-ARI Cauê (CIM), Escória Granulada de Alto-Forno Básica Mizu (EGAF), Sílica ativa Silicon (SA), Areia Média Brasmic.

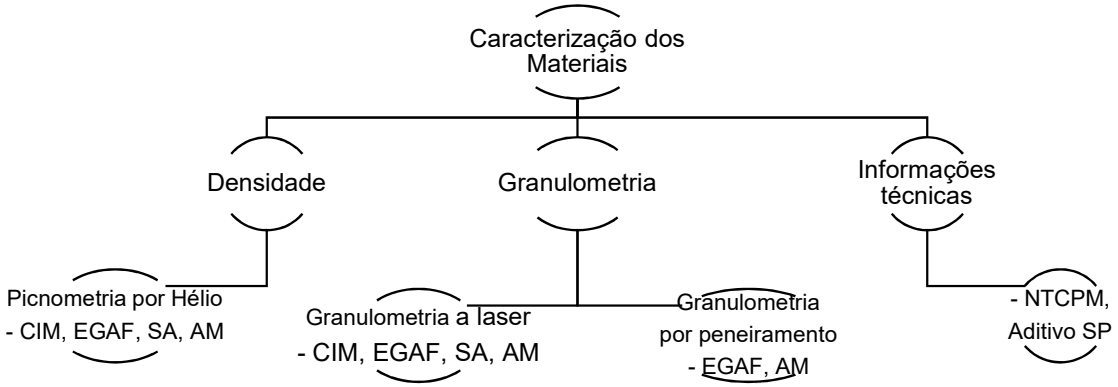
Foram realizados ensaios de picnometria por Hélio para determinação da densidade, além de granulometria por difração de laser utilizando meio de isopropanol. Para a areia média e a EGAF, além desse procedimento, como estão presentes partículas maiores que 500 μm (limite de tamanho suportado pelo granulômetro a laser), foram realizados também ensaios de determinação de granulometria por peneiramento segundo a ABNT NBR NM 248 - Agregados - Determinação da composição granulométrica (2003). Após a realização das duas curvas, as mesmas foram unidas para se obter a informação completa a respeito da granulometria dos materiais.

Além dos materiais citados, o traço proposto conta também com aditivo superplastificante a base de policarboxilato Fluxer (SP), marca ERCA e com nanotubos de carbono de paredes múltiplas (NTCPM), fornecidos pelo CTNano (UFMG), caracterizados por suas informações técnicas.

Os ensaios mencionados foram realizados no Laboratório de Análises Térmicas / Químicas do CEFET-MG, Campus II, em Multipicnômetro Quantachrome (Picnometria) e Granulômetro a laser da marca CILAS (granulometria).

A caracterização seguiu o processo explicitado no fluxograma da Figura 3.

Figura 3 – Fluxograma da Caracterização dos materiais



Fonte: Elaborado pelo autor.

Através da realização dos ensaios mencionados, foi possível obter as informações necessárias à dosagem do material, essas informações são apresentadas resumidamente na Tabela 2. Na busca de maior fluidez na leitura do trabalho, maiores informações acerca da granulometria dos materiais poderão ser encontradas nos anexos da presente dissertação.

Tabela 2 – Caracterização básica dos materiais

Material	**Densidade (g/cm³)**	**Diâmetro a 50% (µm)**	**Tamanho (µm)**	
			Mínimo	**Máximo**
Cimento CPV	3,06	12,56	0,04	85
Sílica ativa	2,23	30,84	0,20	85
EGAF	2,79	-	0,30	2360
Areia Média	2,79	-	0,30	6300

Fonte: O autor, 2018.

3.3 Dosagem do traço através da teoria de empacotamento de partículas

Para a dosagem do traço, utilizou-se o *software EMMA Mix Analyser*, por ter apresentado bons resultados em trabalhos anteriores, como aqueles desenvolvidos por Sbia *et al.* (2017). O programa desenvolvido pela *Elkem*, foi utilizado no modo em que se aplica o modelo Modificado de Andreassen (ou Modelo de Alfred) para promover a proporção ótima de materiais que proporciona o melhor empacotamento de partículas.

Algumas considerações são feitas em relação ao uso do *software* em questão: o valor de q utilizado é de 0,37, por ser o valor recomendado pela literatura para a dosagem de CUAD (vide item 2.2.2). Adicionalmente, os NTCPM não foram considerados como dados de entrada para a dosagem, uma vez que suas dimensões são nanométricas e os percentuais de partículas dispersas nas partículas de cimento são muito pequenos (0,05 e 0,1% em peso).

Dessa forma, através dos dados de densidade e das curvas granulométricas completas dos materiais, utilizou-se o software mencionado para se obter traços de CUAD candidatos a serem utilizados na presente pesquisa. Após a realização de moldagens e avaliação de aspectos de trabalhabilidade e resistência, elencou-se o traço adequado para seguir adiante durante a pesquisa, o traço em questão pode ser observado na Tabela 3.

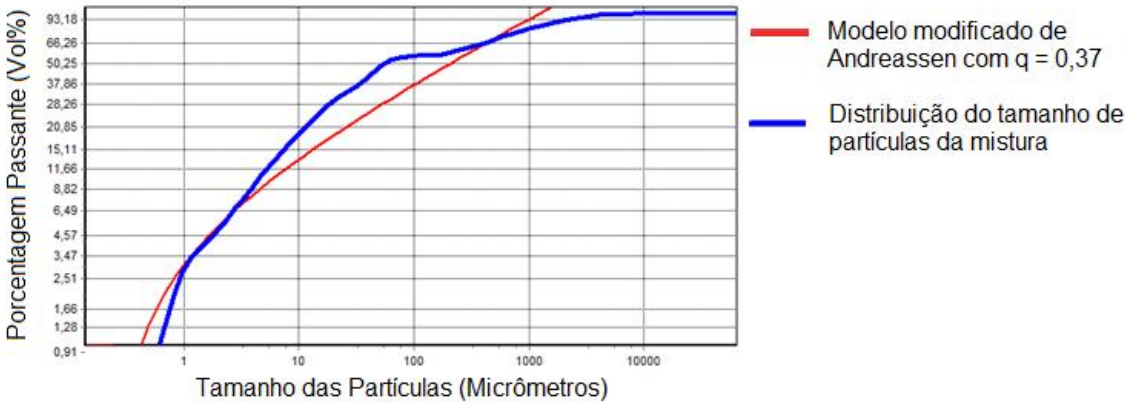
Tabela 3 – Traço CUAD

Material	Traço em massa	Qtd (kg)	Densidade (kg/m³)	Volume (m³)
Cimento CPV ARI	1	935	3060	0,31
EGAF	0,15	140	2790	0,05
Sílica Ativa	0,25	234	2230	0,10
Areia Média	1,00	935	2790	0,34
Aditivo superplastificante	0,02	19	2500	0,01
Água	0,21	196	1000	0,20
Total		2459	-	~1

Fonte: Obtido pelo autor através do software *EMMA Mix Anayser*, 2018.

A aproximação entre o traço em questão e a curva ideal apresentada pela Teoria do Empacotamento de partículas utilizando o modelo Modificado de Andreassen pode ser observada na Figura 4.

Figura 4 – Curva traço CUAD versus curva-alvo do Modelo MA



Fonte: Obtido pelo autor através do software *EMMA Mix Anayser*, 2018.

3.4 Dispersão dos nanotubos de carbono de paredes multiplas

Considerando-se que os processos de dispersão de NTC constituem um desafio em sua utilização, foram realizados testes preliminares no sentido de avaliar a melhor forma de dispersão a ser utilizada. O ponto de partida dessa avaliação foi o procedimento padronizado por Rocha (2018), que consiste basicamente na dispersão de NTC não funcionalizados em solução não aquosa de isopropanol com o uso de dispersor mecânico e energia ultrassônica.

Após o desenvolvimento desses testes preliminares, criou-se procedimento próprio, baseado no método padronizado por Rocha (2018), porém aprimorado para

a aplicação específica necessária para a presente pesquisa. O procedimento resultante consiste no acréscimo de 160 ml de isopropanol às quantidades correspondentes a 0,05% e 0,1% em peso do nanomaterial em relação ao peso de cimento. A mistura é então submetida à energia ultrassônica com frequência ultrassônica de 42 Hz por 40 minutos para dispersão dos NTC no meio de isopropanol. Em seguida, acrescenta-se 10% da quantidade total de cimento destinada a uma moldagem e introduz-se agitação mecânica por meio de dispersor a uma frequência de 500 rpm simultaneamente ao uso do aparelho de ultrassom, por 60 minutos.

Após esse período, ocorre repouso por 24 horas em estufa a 105ºC, para a evaporação do isopropanol. Após o período de repouso, a mistura de cimento com NTCPM seca é acrescentada e misturada manualmente ao restante de cimento em quantidade necessária para produção dos corpos de prova de CUAD.

3.5 Moldagem dos corpos de prova

Assim como nos demais procedimentos experimentais, para a moldagem foi necessária a realização de testes preliminares no intuito de definir o procedimento capaz de resultar em um material moldável e efetivamente resistente. As principais dificuldades ocorrem em razão da reduzida quantidade de água, o que dificulta a formação de material homogêneo com consistência adequada.

Nesse contexto, foram estudados diversos métodos empregados em trabalhos anteriores (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2015; KHALOO *et al.*, 2017; QUEIROZ, 2018) e, considerando-se as peculiaridades dessa pesquisa, criou-se um procedimento próprio. Em primeiro lugar, foram adicionados os 10% de cimento com NTC ao restante da quantidade total de cimento da moldagem, com homogeneização manual com auxílio de um saco plástico. Em seguida todos os materiais, exceto o cimento, foram misturados por 3 minutos em argamassadeira eletromecânica na velocidade lenta. Adicionou-se o cimento em duas etapas de 30 segundos com intervalo de 30 segundos entre si e por fim, a mistura foi mantida em alta velocidade por 10 minutos. Foram moldados 6 CPs cilíndricos com 5 cm de diâmetro e 10cm de altura para cada traço. O processo de adensamento foi manual com o auxílio de mesa vibratória em duas etapas

Após 24 horas, os CPs foram desmoldados e iniciou-se o processo de cura submersa à temperatura ambiente, que ocorreu por 24 horas. Em seguida, os CPs foram submetidos à cura térmica em estufa a 230ºC por mais 24 horas. Após a cura térmica, os CPs foram isolados em sacos plásticos até o seu rompimento aos 28 dias ou submissão ao aquecimento.

Antes dos procedimentos experimentais, os CPs foram secos em estufa a 105ºC por 24 horas. O processo de secagem é importante no sentido de remover a água presente no interior dos CPs lentamente, de forma a evitar que a mesma gere pressões elevadas nos ensaios de aquecimento e acarrete em *spalling* precoce em relação ao esperado. Além disso, é necessário garantir a ausência de água livre nos procedimentos de medição de massa para posterior avaliação de perda de massa e modificações de densidade aparente.

3.6 Procedimentos de submissão ao aquecimento

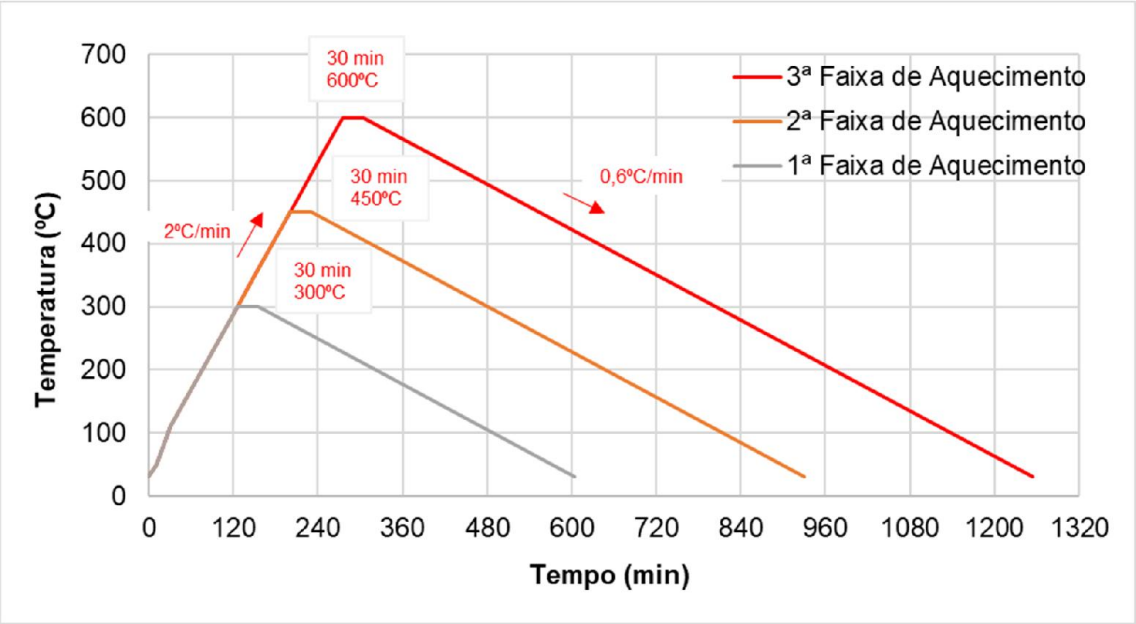
3.6.1 Aquecimento lento

A submissão ao aquecimento lento visa avaliar as modificações comportamentais ao longo da elevação de temperatura, de forma a se mensurar o fenômeno do *spalling* e acompanhar-se a perda de resistência e modificações de propriedades do material. Foram estabelecidas três faixas de aquecimento até um máximo de 600ºC, já que, segundo a literatura, acima dessa temperatura, as perdas de resistências são muito substanciais (FELICETTI E GAMBAROVA, 2000). Considerando-se a ocorrência típica de *spalling*, maior preocupação quando se trata de CUAD, como sendo entre 260°C a 520°C (ZHENG *et al.*, 2013), estabeleceram-se as três faixas, sendo de 30ºC (aproximadamente a temperatura ambiente) até 300ºC; de 30ºC até 450ºC e de 30º até 600ºC.

A taxa de aquecimento adotada foi de 2ºC/minuto, sendo que, uma vez atingida a temperatura alvo, a mesma foi mantida por 30 minutos, para garantir a distribuição da temperatura uniformemente em todos os corpos de prova e proporcionar tempo suficiente para equilíbrio térmico entre os corpos de prova e a câmara do equipamento. Após esses 30 minutos à temperatura constante, os corpos de prova passaram por resfriamento lento, no sentido de evitar choque térmico, que poderia prejudicar as avaliações pretendidas; a taxa de resfriamento adotada foi de 0,6ºC/minuto. Foram preparados 7 corpos de prova de cada traço para serem

submetidos a cada faixa de aquecimento. O processo em questão pode ser compreendido através da Figura 5.

Figura 5 – Gráfico representativo do procedimento de Aquecimento Lento



Fonte: Elaborado pelo autor.

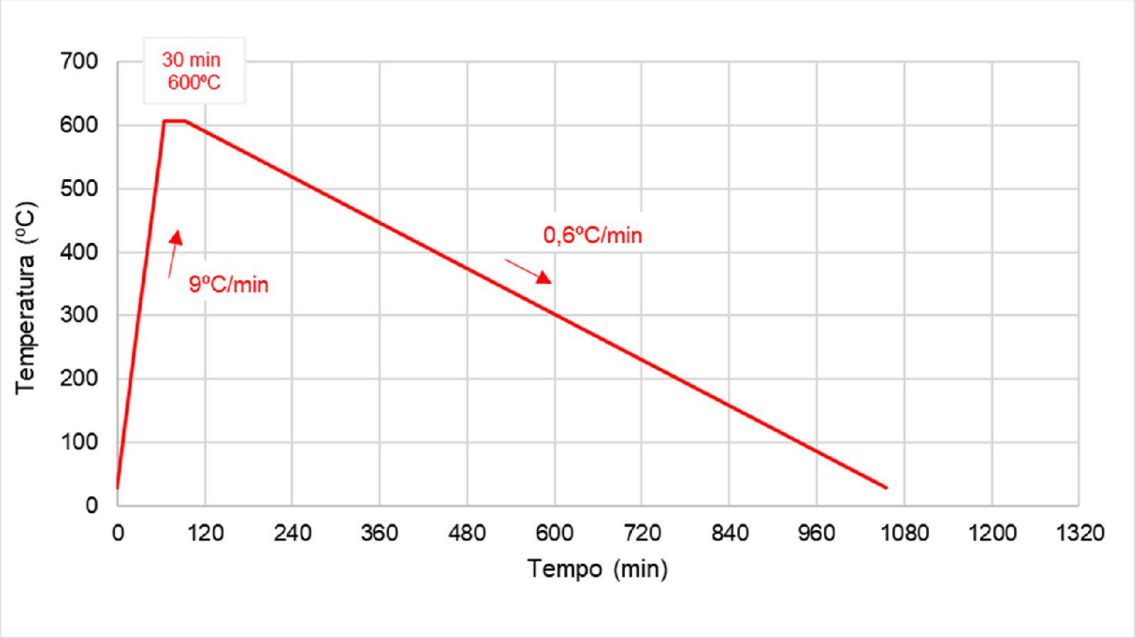
3.6.2 Aquecimento rápido

A submissão ao aquecimento rápido se destina a avaliação dos aspectos desejados quando o material é submetido à elevação de temperatura de maneira global, pretende-se aqui avaliar a ocorrência de *spalling* e as modificações de propriedades submetendo-se o material ao aquecimento a uma temperatura limite à sua perda completa de resistência. Dessa forma, podem ser avaliados os efeitos da elevação de temperatura de maneira mais realística e ainda compará-los com aqueles causados pelo aquecimento gradual, mensurando-se a influência da taxa de elevação de temperatura.

A taxa de aquecimento adotada foi de 9ºC/minuto, uma vez atingida a temperatura alvo, a mesma foi mantida por 30 minutos, para garantir a distribuição da temperatura uniformemente em todos os corpos de prova e proporcionar tempo suficiente para equilíbrio térmico entre os corpos de prova e a câmara do equipamento. Após esses 30 minutos à temperatura constante, os corpos de prova passaram por resfriamento lento, no sentido de evitar choque térmico, que poderia

prejudicar as avaliações pretendidas; a taxa de resfriamento adotada foi de 0,6ºC/minuto. Foram preparados 7 corpos de prova de cada traço para serem submetidos ao aquecimento rápido. O processo mencionado está esquematizado na Figura 6.

Figura 6 – Gráfico representativo do procedimento de Aquecimento Rápido



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.7 Procedimentos de avaliação do comportamento do material

3.7.1 *Spalling*

Na busca de se avaliar as modificações introduzidas pela presença dos NTC quanto ao fenômeno do spalling, frequente em CUAD, em cada fase de aquecimento, foram observadas e registradas as ocorrências de lascamentos explosivos. Mensurou-se a quantidade de corpos de prova que explodiram e também a temperatura de ocorrência da explosão.

3.7.2 Resistência à compressão residual

Aos 28 dias de idade, os corpos de prova de referência foram ensaiados para conhecimento de sua resistência à compressão. Após serem submetidos aos regimes de aquecimento descritos em 3.6, corpos de prova de CPR passaram por ensaio para obtenção de sua resistência à compressão residual, ou seja, para

avaliação da parcela de resistência que permanece após a exposição a elevadas temperaturas em relação à resistência apresentada por aqueles em que não houve essa elevação. Os ensaios foram realizados em equipamento de ensaios universal da marca EMIC com célula de carga de 2000 kN para compressão axial, com velocidade do ensaio de 0,20 MPa/seg.

3.7.3 Densidade aparente

A definição de densidade aparente fornecida por Roquerol *et al.* (1994) indica que essa grandeza trata-se da densidade do material incluindo poros fechados e inacessíveis. Dessa forma, avaliaram-se as modificações sobre a densidade aparente promovidas pelas submissões ao aquecimento. Todos os corpos de prova, após procedimento de secagem a 105º C, foram criteriosamente pesados em balança com capacidade de 2 kg e precisão na segunda casa decimal, além disso, foram medidos em no mínimo 3 regiões para a mesma dimensão com Paquímetro analógico Mitutoyo. Após terem passado pelo processo de aquecimento, essas grandezas foram novamente medidas e foi possível calcular a densidade aparente antes e após o aquecimento desses corpos de prova.

3.7.4 Densidade Picnométrica

A avaliação da densidade do material por picnometria por átomos de Hélio será tratada aqui como densidade picnométrica. Após ruptura dos corpos de prova, foram retiradas amostras para avaliação de sua densidade por meio de picnometria por Hélio, realizada em aparelho Multipcnômetro Quantachrome.

3.7.5 Avaliação da macroestrutura

Avaliou-se a superfície de ruptura de todos os corpos de prova em relação à sua morfologia, avaliada qualitativamente por microscópio digital com capacidade aumento de imagem de até 1000 vezes, através do qual foram obtidas imagens em que se pôde observar o aspecto da pasta de cimento e dos agregados.

3.7.6 Perda de massa

Todos os corpos de prova foram pesados em balança com capacidade de 2 kg e precisão na segunda casa decimal, após processo de secagem a 105ºC. Depois de

terem passado pelo processo de aquecimento, sua massa foi novamente obtida para avaliação da perda de massa proveniente dos processos de aquecimento.

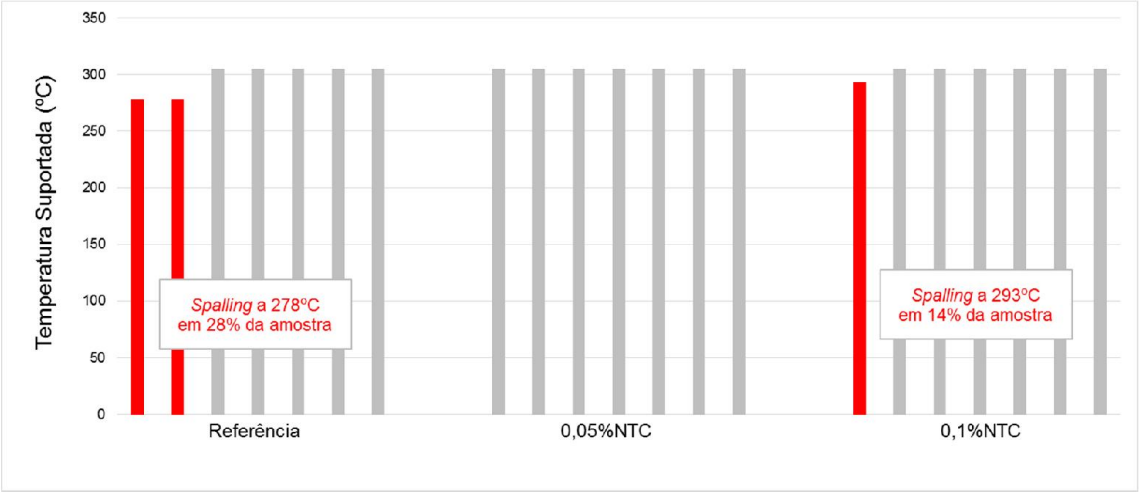
4 RESULTADOS

4.1 Resultados após aquecimento lento

4.1.1 *Spalling*

Durante a primeira faixa de aquecimento lento (de 30ºC a 300ºC), foi possível observar *spalling* em dois corpos de prova, 28% da amostra, do traço de referência e um corpo de prova no traço 0,1% NTC, 14% da amostra (Figura 7). Já no traço de 0,05% NTC, não ocorreu explosão alguma durante todo o aquecimento. Em relação à temperatura de ocorrência, verificou-se que a explosão ocorre a 278ºC para o traço de referência, enquanto no traço 0,1% NTC, ocorre um aumento de 5,4%, elevando a temperatura de ocorrência para 293ºC.

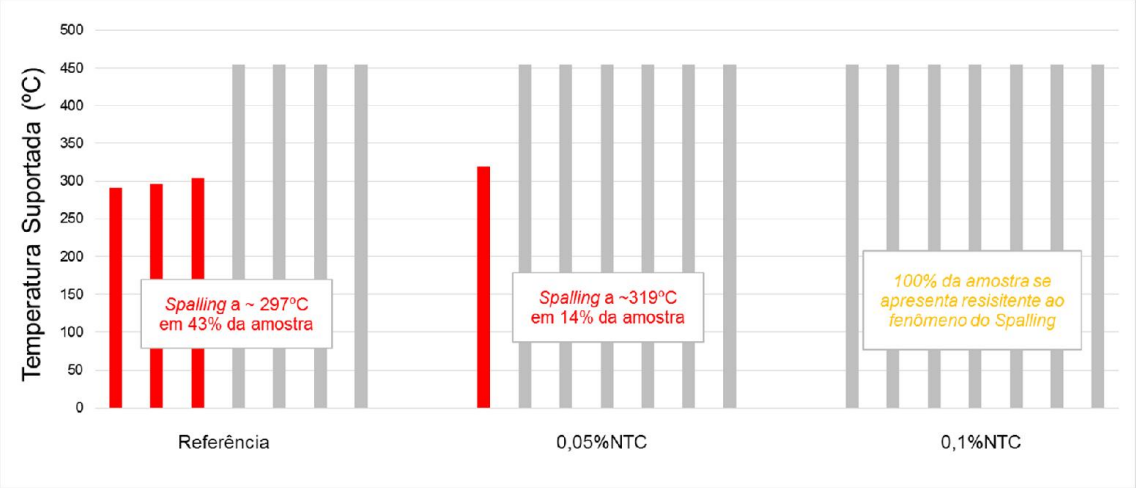
Figura 7 – Ocorrência do fenômeno do *Spalling*
1ª Faixa de Aquecimento (30ºC a 300ºC)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na segunda faixa de aquecimento lento (de 30ºC a 450ºC), a ocorrência de *spalling* na amostra de referência é de três corpos de prova, representando 43% da amostra, já no material contendo 0,05% de nanotubos de carbono, o lascamento explosivo foi observado em um corpo de prova, ou seja, 14% da amostra, ao passo que no traço 0,1% NTC, não foi detectada explosão alguma durante todo o aquecimento (Figura 8). A respeito da temperatura de ocorrência, para a referência, observou-se temperatura média de aproximadamente 297ºC, enquanto no traço 0,05%NTC, o fenômeno se apresentou em temperatura mais elevada, de 319ºC.

Figura 8 – Ocorrência do fenômeno do *Spalling*
2ª Faixa de Aquecimento (30ºC a 450ºC)

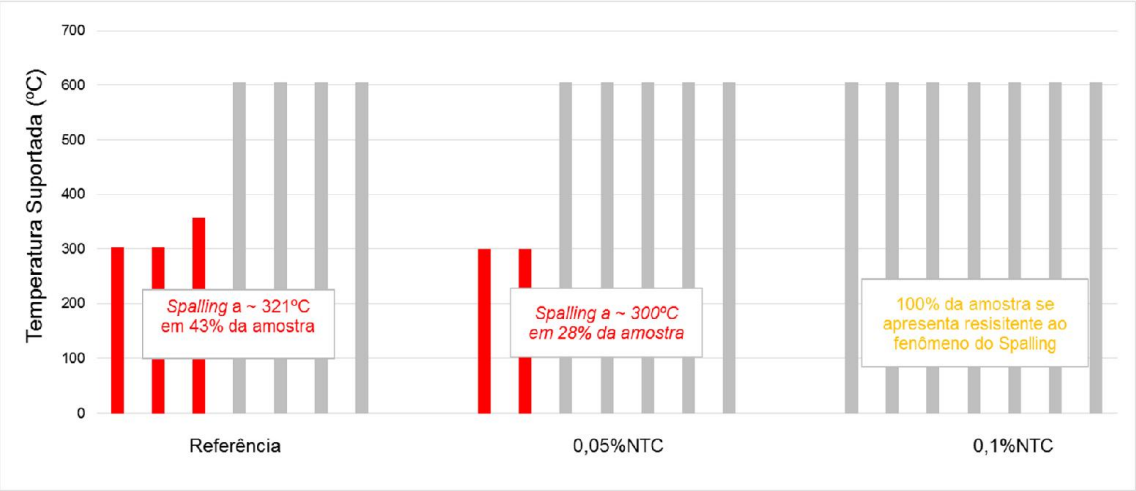


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na terceira faixa de aquecimento lento (de 30ºC a 600ºC), a ocorrência de *spalling* na amostra de referência é de três corpos de prova, representando 43% da amostra, já no material contando 0,05% de nanotubos de carbono, o lascamento explosivo foi observado em dois corpos de prova, ou seja, 28% da amostra, ao passo que no traço 0,1% NTC (Figura 9), novamente não foi detectada explosão alguma durante todo o aquecimento. A respeito da temperatura de ocorrência, para a referência, observou-se temperatura média de aproximadamente 321ºC, enquanto no traço 0,05NTC, o fenômeno se apresentou a 300ºC.

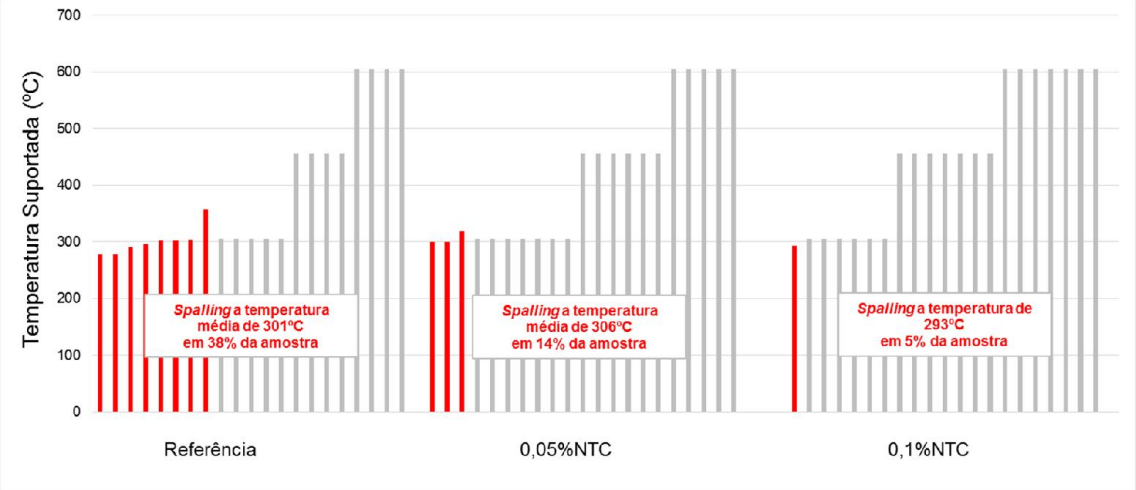
Considerando-se as três faixas de aquecimento lento, avaliou-se a ocorrência do fenômeno como um todo (Figura 10). Constatou-se que na amostra global de referência, foi possível observar a ocorrência de *spalling* em 38% da amostra, a uma temperatura média de 301ºC. Quando se trata do traço 0,05%NTC, essa ocorrência é de apenas 14% da amostra, com uma temperatura média ligeiramente maior, de 306ºC. O traço 0,1%NTC apresentou apenas uma ocorrência durante todo o processo, representado 5% da amostra, sendo de 293ºC a temperatura de ocorrência de *spalling*.

Figura 9 – Ocorrência do fenômeno do *Spalling*
3ª Faixa de Aquecimento (30ºC a 600ºC)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 10 – Ocorrência do fenômeno do *Spalling* – Aquecimento Lento



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao avaliar os resultados supracitados para o comportamento do CUAD no que diz respeito ao *spalling*, encontram-se evidências de que a presença dos NTC propicia menor ocorrência do fenômeno. Em termos práticos, o traço de 0,1%NTC se mostra resistente ao lascamento explosivo, enquanto o traço 0,05%NTC apresenta boa redução de ocorrência em relação ao traço de referência, cerca de 37,5% menor.

Em relação à temperatura de ocorrência de *spalling*, os resultados estão em conformidade com o que se esperava através da revisão da literatura, que já

indicava a faixa de observação sendo entre 260°C a 520°C (ZHENG *et al.*, 2013), estando todas as temperaturas médias de observação do fenômeno próximas de 300ºC. Não se encontram indícios de que a incorporação dos NTC tenha acarretado em alguma modificação da temperatura em que ocorrem os lascamentos explosivos. As temperaturas médias de ocorrência são consideravelmente próximas, não alcançando variações maiores que 5% em relação à média.

Acredita-se que, para a composição do material utilizado na presente pesquisa, a expansão dos vapores presentes nas estruturas químicas resultantes da hidratação do cimento ocorra em temperaturas próximas a 300ºC, ocasionando *spalling*. Essa hipótese é sustentada pela teoria de que a estrutura de C-S-H gel nas pastas de cimento hidratado consiste em glóbulos com camadas desordenadas, entre as quais estão presentes moléculas de água. Quando a temperatura é suficientemente elevada, essas moléculas de água se desprendem, ocorre mudança de fase e dilatação, criando tensões no material (ZHANG; YE, 2012).

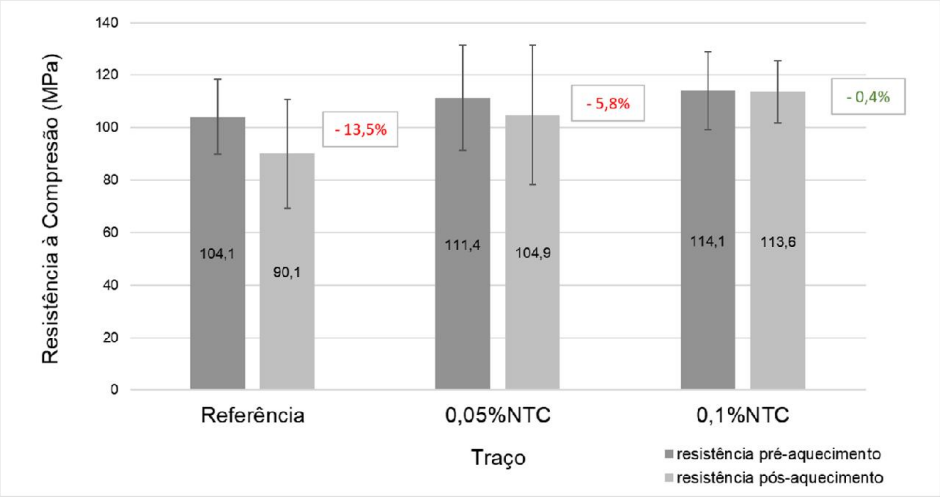
A diminuição da ocorrência do *spalling* indica que a inclusão de NTC, cujo diâmetro externo encontra-se entre 10 e 50 nm, pode ter criado uma estrutura de poros que facilitou a saída de vapores sem elevar a pressão interna a ponto de causar explosões. Dessa forma, aliviaram-se as tensões provenientes das expansões de moléculas de água presentes nos produtos de hidratação do cimento, sendo que o C-S-H gel apresenta glóbulos com dimensões aproximadas de 5 nm (ZHANG; YE, 2012). Há ainda a possibilidade de os NTC terem aumentado a resistência à tração do material, fazendo com que o mesmo suportasse as tensões que acarretariam em *spalling*.

4.1.2 Resistência à compressão residual

Avaliaram-se os valores de resistência apresentados pelos corpos de prova que passaram pelo aquecimento sem explosão, não tendo sido feitas considerações acerca desses últimos, avaliação chamada de resistência à compressão residual.

Nos corpos de prova provenientes da primeira faixa de aquecimento lento (30ºC a 300ºC), foram observadas quedas de resistência à compressão (Figura 11), sendo média de 13,5% no traço de referência e de 5,8% no traço 0,05%NTC, já o traço 0,1%NTC manteve sua resistência, sofrendo redução insignificante de apenas 0,4%.

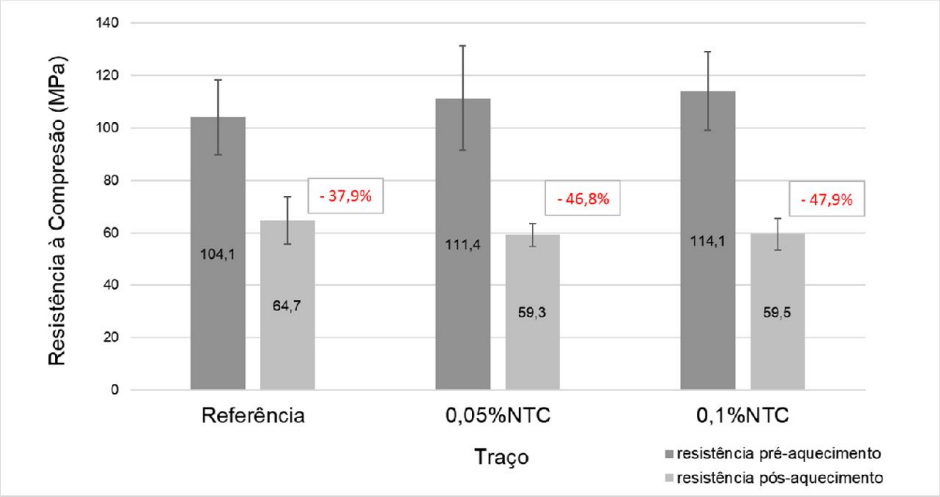
Figura 11 – Resistência à compressão residual
1ª Faixa de Aquecimento (30ºC a 300ºC)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a segunda faixa de aquecimento lento (até 450ºC), foram observadas quedas de resistência à compressão mais acentuadas em relação à primeira faixa (Figura 12). O material de referência apresentou queda de 37,9%, ao passo que os traços com NTC apresentaram praticamente a mesma perda de resistência, sendo de 46,8% para 0,05%NTC e 47,8% para 0,1% NTC.

Figura 12 – Resistência à compressão residual
2ª Faixa de Aquecimento (30º a 450ºC)

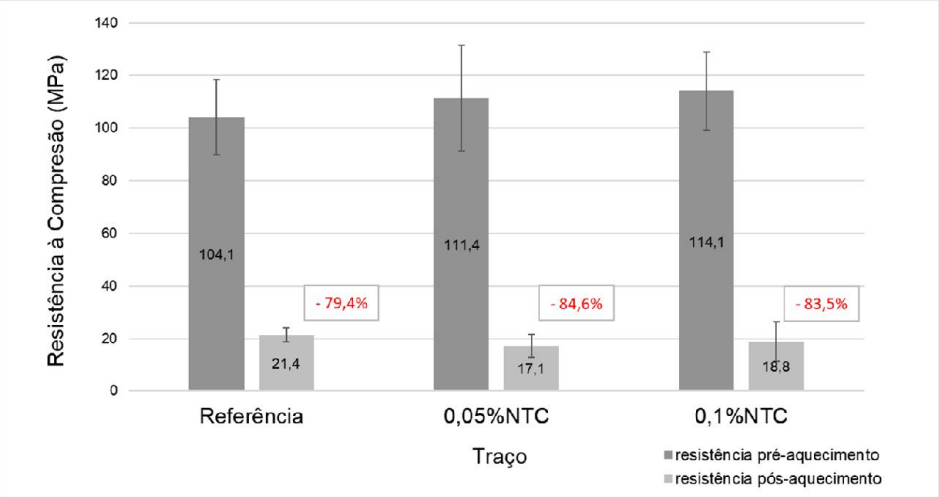


Fonte: Elaborado pelo autor.

Realizada a terceira faixa de aquecimento lento (até 600ºC), foram observadas quedas ainda mais acentuadas em relação à primeira faixa (Figura 13). O material de referência apresentou queda de 79,4%, ao passo que os traços com NTC apresentaram novamente quedas muito próximas de 84,6% para 0,05%NTC e 83,5% para 0,1% NTC.

Figura 13 – Resistência à compressão residual

3ª Faixa de Aquecimento (30ºC a 600ºC)

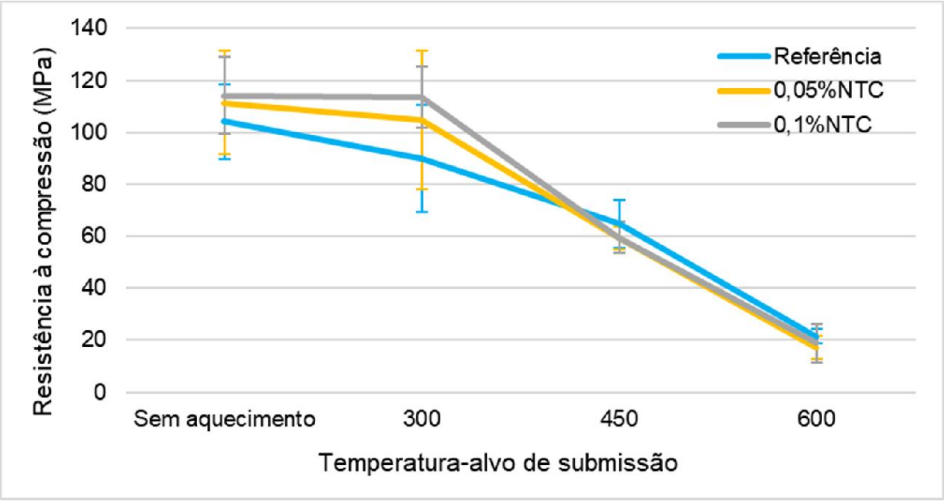


Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando-se as três faixas de aquecimento, desenvolveram-se as curvas de resistência à compressão residual com o acréscimo de temperatura do procedimento de aquecimento lento (Figura 14).

Figura 14 – Resistência à compressão residual

Aquecimento lento



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados de resistência à compressão residual indicam não haver influência importante da presença dos NTC nessa grandeza. Apesar de a 300ºC o traço 0,1%NTC ter apresentado perda percentual média de resistência significativamente menor, quando considerados os desvios encontrados, essa diferença não se torna tão preponderante. Analisando-se a submissão à 450ºC e 600ºC, as perdas percentuais são ainda mais próximas entre os traços, reforçando a suposição de que a incorporação não implicou em efeitos consideráveis nesse sentido.

Em relação à variação percentual da resistência à compressão residual, observa-se em todos os traços uma diminuição mais acentuada de seu valor a partir de 300ºC. As perdas percentuais podem se apresentar mais elevadas com o aumento da temperatura não somente em razão da submissão a uma temperatura-alvo maior, mas também em razão dos corpos de prova permanecerem mais tempo em elevadas temperaturas. A literatura já indica que quanto maior a duração da elevação de temperatura, menor a resistência à compressão residual (WANG ET. AL, 2015).

Acredita-se que as perdas de resistência mais acentuadas sejam provenientes de modificações que ocorrem na pasta de cimento, já que os agregados não apresentam efeitos significativos nas faixas de temperatura ensaiadas. O agregado miúdo utilizado é areia quartzosa e, sendo o ponto de fusão do quartzo de 1713ºC (BARBOSA E PORPHIRIO, 1995), não deve haver decomposições significativas até 600ºC. Da mesma forma, a escória granulada de alto forno, em razão de ser formada a temperaturas consideravelmente mais elevadas que as ensaiadas, não deve apresentar contribuição às perdas de resistência.

A redução de resistência à temperatura-alvo de 450ºC pode estar relacionada à fissurações que ocorrem em razão das tensões internas que se desenvolvem no material com o aquecimento gerando expansão de vapores e dilatações térmicas. Além disso, podem contribuir a decomposição de hidróxidos e carbonatos de cálcio, que ocorrem entre 430ºC e 600ºC (PENG, 2008).

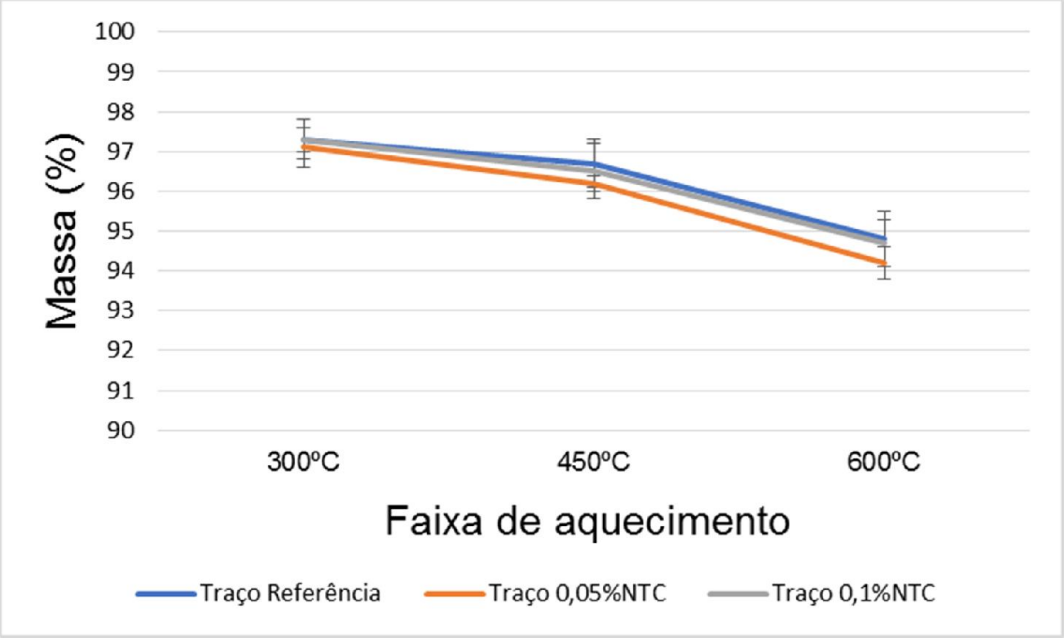
Quando considerada a terceira faixa de aquecimento, em que se submete o material à 600ºC, a queda na resistência à compressão é mais acentuada, perdendo-se mais de 80% da resistência original. Essa redução expressiva ocorre em razão da decomposição do C–S–H, principal produto de hidratação da pasta de

cimento e responsável por maior parte da resistência à compressão do compósito. A decomposição do C–S–H se inicia a 560ºC, mas é a 600ºC que essa decomposição se torna mais significativa e a taxa de decomposição aumenta drasticamente (PENG E HUANG, 2008). A 600ºC, até mesmo os nanotubos de carbono podem deixar de exercer seu papel na resistência à compressão, já que se desintegram a 585ºC, conforme informações técnicas levantadas junto ao CTNano (Anexo VIII).

4.1.3 Perda de massa

Para os corpos de prova em que não ocorreu *spalling* explosivo, percebeu-se redução em sua massa após o aquecimento (Figura 15). A perda de massa média verificada após a primeira faixa de aquecimento é de 2,7%, 2,9% e 2,7% para os traços de referência, 0,05% NTC e 0,1% NTC, respectivamente. Seguindo essa tendência de proximidade entre a referência e o Traço 0,1%NTC e de valores ligeiramente maiores de perda para o traço 0,05%NTC, a segunda faixa apresentou 3,3%, 3,8% e 3,5%, na mesma ordem. Já a terceira faixa, acarretou em perdas maiores, com mesma tendência, sendo 5,2%, 5,8% e 5,3%, também na mesma ordem.

Figura 15 – Perda de massa– Aquecimento Lento



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores apresentados para a perda de massa são muito próximos entre si quando se comparam os traços ensaiados, sendo sua diferença irrelevante, essa constatação é reforçada quando se observam os desvios encontrados, de forma que se pode considerar que a perda de massa não sofre efeitos significativos com a adição de NTC.

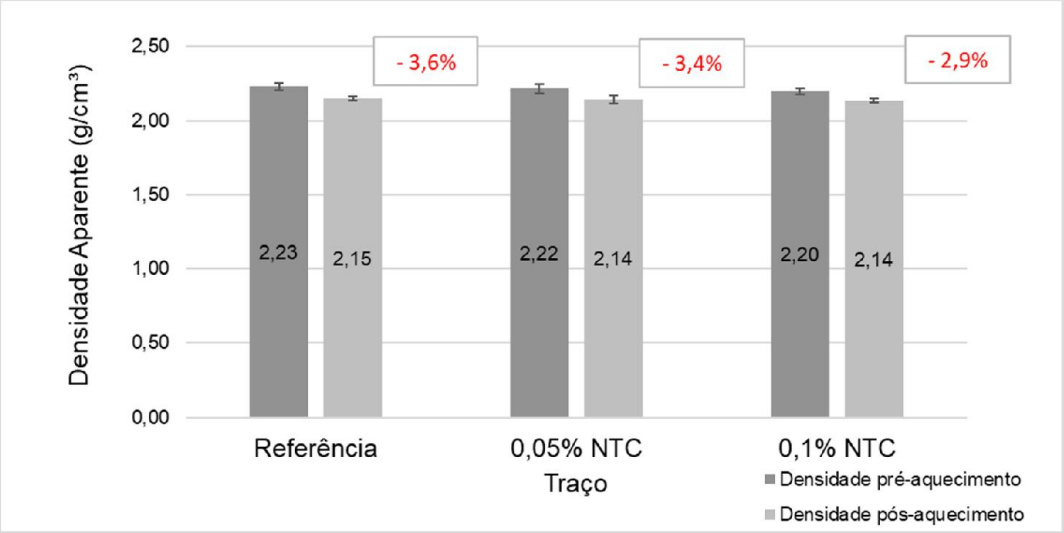
Observa-se que a perda de massa cresce com a temperatura, a média dos resultados obtidos para a temperatura alvo de 600ºC é aproximadamente 54% maior que aqueles obtidos para 450ºC, que por sua vez superam os resultados da temperatura alvo de 300ºC em aproximadamente 28%. Quando comparados os resultados da terceira faixa (30ºC a 600ºC) com a primeira (30ºC a 300ºC), o valor da perda de massa dobra.

Os resultados estão alinhados com o que se espera através da literatura, Abid *et al.* (2017), em sua revisão, elenca uma série de valores de perda de massa mensurados para diversos traços CPR. Nesse estudo, pode-se perceber que os intervalos de valores de perda de massa por temperatura são relativamente grandes (aproximadamente de: 0,2% a 7,5% para 300ºC, 1,9% a 9% para 450ºC e 2% a 10% para 600ºC).

4.1.4 Densidade aparente

Observou-se modificação de densidade aparente dos corpos de prova após a realização das faixas de aquecimento (Figura 16). Para a primeira faixa, observou-se queda em todos os traços, sendo o percentual de queda de 3,6%,3,4% e 2,9% para os traços de referência, 0,05% NTC e 0,1% NTC, respectivamente.

Figura 16 – Modificação de Densidade Aparente
1ª Faixa de Aquecimento (30ºC a 300ºC)

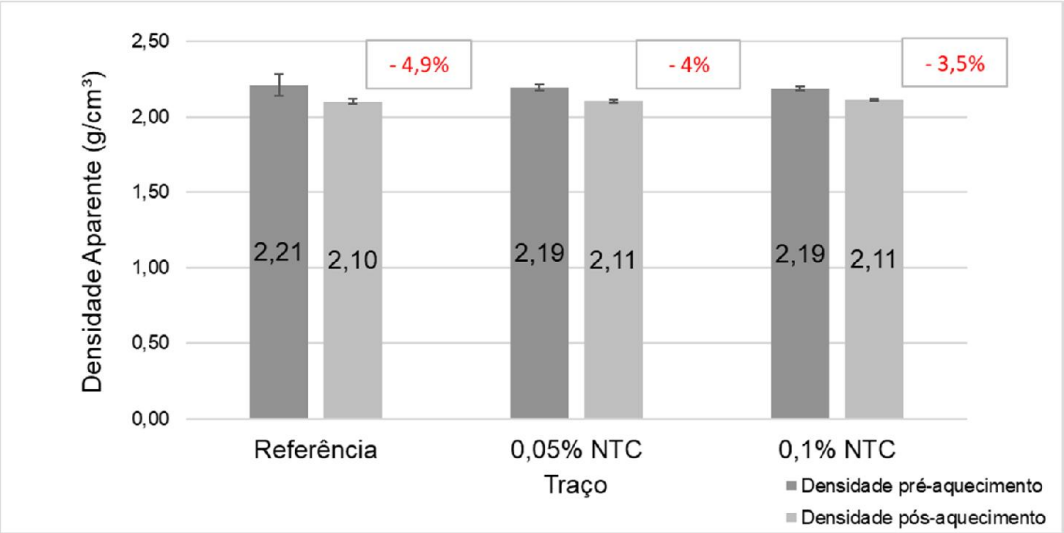


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na segunda faixa (até 450ºC), a tendência de reduções menores com a inclusão dos NTC se mantém, sendo o percentual de queda de 4,9%,4% e 3,5% para os traços de referência, 0,05% NTC e 0,1% NTC, respectivamente (Figura 17).

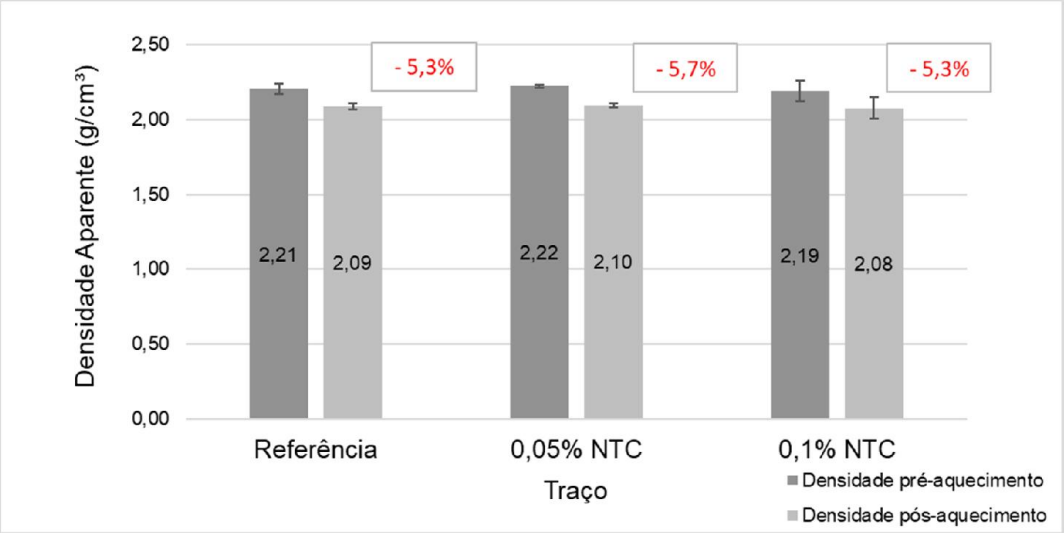
Após aquecimento até 600ºC, terceira faixa, observou-se queda em todos os traços (Figura 18), sendo o percentual de queda de 5,3%,5,7% e 5,3% para os traços de referência, 0,05% NTC e 0,1% NTC, respectivamente.

Figura 17 – Modificação de Densidade Aparente
2ª Faixa de Aquecimento (30ºC a 450ºC)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 18 – Modificação de Densidade Aparente
3ª Faixa de Aquecimento (30ºC a 600ºC)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar-se os resultados de modificações de densidade aparente, observa-se que os mesmos encontram-se em conformidade com o que se espera em razão dos resultados de resistência à compressão residual e perda de massa, ou seja, diminuição da densidade com o aumento da temperatura. Assim como observado para perda de massa, verifica-se que quando considerados os desvios dos valores

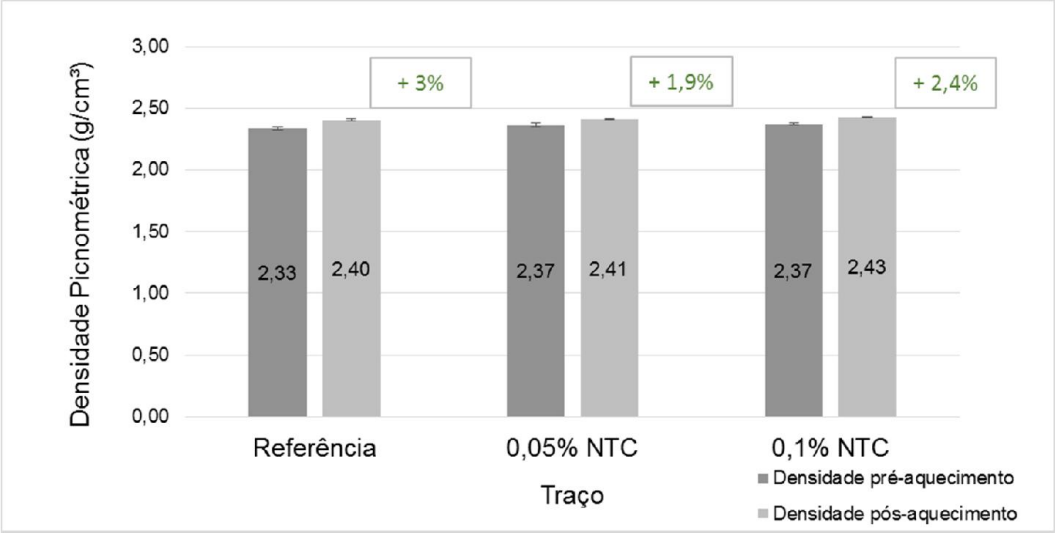
de densidade, não se pode afirmar haver diferenças significativas entre os traços, entretanto encontram-se diferenças de densidade na comparação de valores pré e pós-aquecimento.

Os resultados em questão apresentam perdas percentuais próximas daquelas apresentadas para a perda de massa, o que já se esperava em razão de não terem sido verificadas variações dimensionais significativas com os processos de aquecimento.

4.1.5 Densidade picnométrica

No sentido de se obter dados precisos acerca das modificações de densidade, mensurou-se a densidade picnométrica dos corpos de prova através de ensaios de Picnometria por Hélio. Para a primeira faixa, foram encontrados pequenos acréscimos de densidade, sendo de 3%,1,9% e 2,4% para os traços de referência, 0,05%NTC e 0,1%NTC respectivamente (Figura 19).

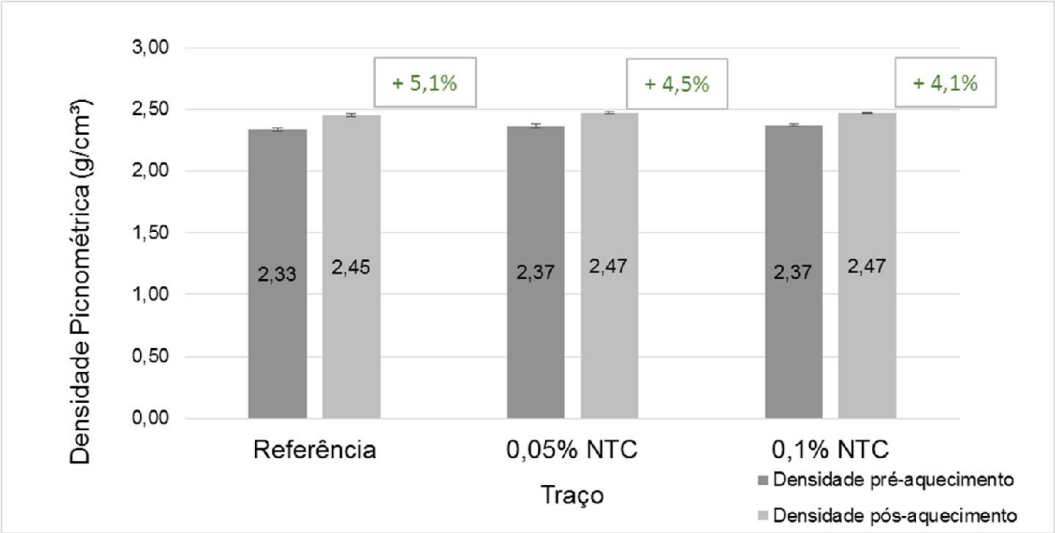
Figura 19 – Modificação de Densidade Picnométrica
1ª Faixa de Aquecimento (30ºC a 300ºC)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados encontrados após a segunda faixa de aquecimento, mantem a tendência de pequenos acréscimos de densidade, tendo apresentado elevações de 5,1% para a referência, 4,55% para o traço 0,05%NTC e finalmente 4,1% para 0,1%NTC (Figura 20).

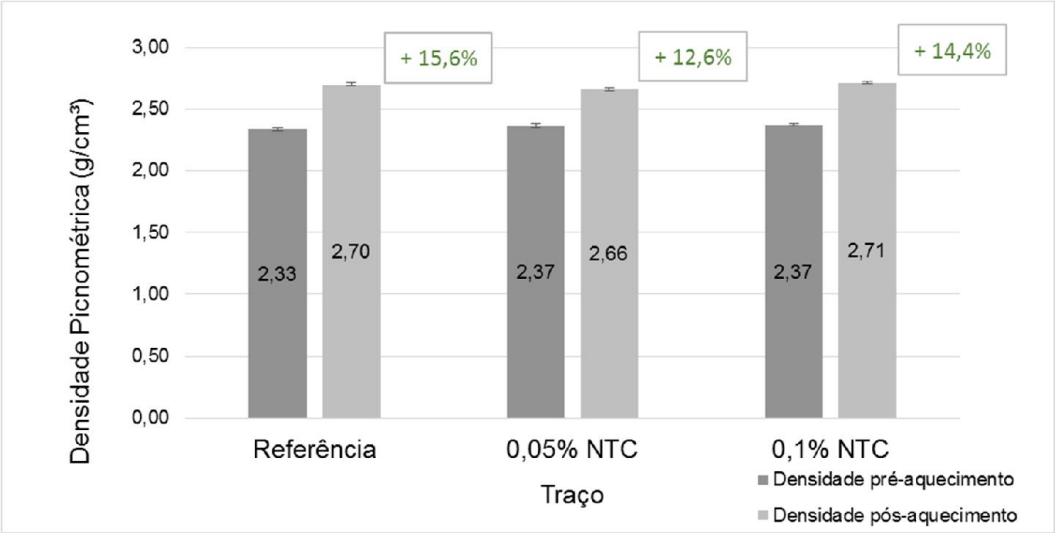
Figura 20 – Modificação de Densidade Picnométrica
2ª Faixa de Aquecimento (30ºC a 450ºC)



Fonte: Elaborado pelo autor.

A faixa de temperatura mais elevada manteve a tendência de acréscimo nos valores de densidade, sendo de 15,6%, 12,6% e 14,4% para os traços de referência, 0,05%NTC e 0,1%NTC respectivamente (Figura 21).

Figura 21 – Modificação de Densidade Picnométrica
3ª Faixa de Aquecimento (30ºC a 600ºC)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os acréscimos dos valores de densidade com o aumento de temperatura podem parecer contraditórios a um primeiro olhar, já que a resistência à compressão dos

corpos de prova diminui consideravelmente. Apesar disso, uma possível explicação para esses resultados pode residir na observação da microestrutura da superfície de rompimento dos corpos de prova, vide item 4.1.6. Conforme a temperatura aumenta, há indícios de desintegração da pasta de cimento, restando os agregados, sendo areia quartzosa média e partículas de EGAF, que apresentam valores maiores de densidade (2,79 g/cm³, neste caso).

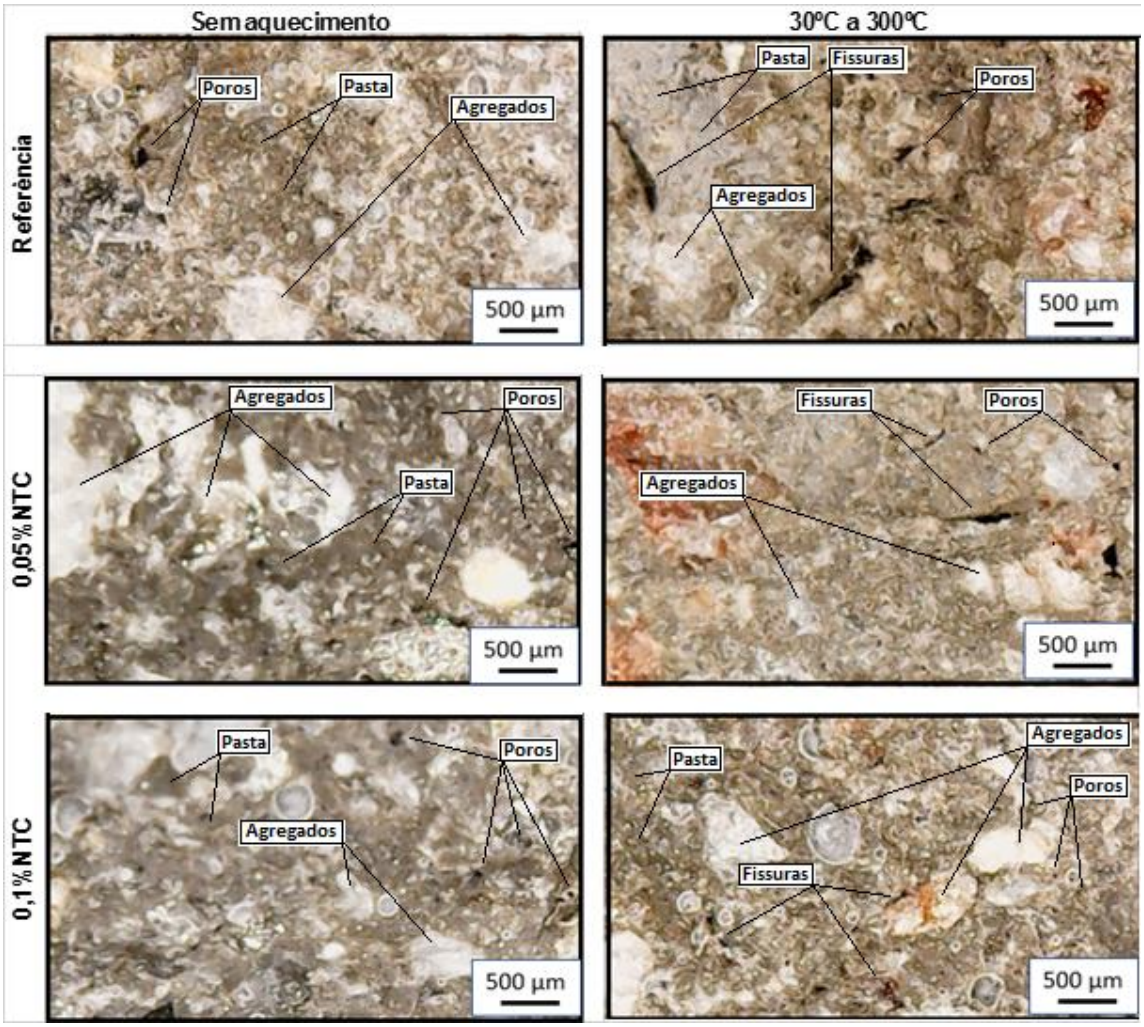
Em razão dessa desintegração, acredita-se que o Picnômetro, ao avaliar a densidade das amostras com átomos de Hélio, esteja avaliando apenas as partículas íntegras de agregados, além de algum resíduo de pasta de cimento ainda aderido às mesmas, o que poderia levar a resultados semelhantes aos encontrados, com o acréscimo gradual da densidade à medida que se agrava a desintegração da pasta de cimento.

4.1.6 Avaliação da macroestrutura

As imagens obtidas para avaliação da macroestrutura podem ser observadas nas Figuras 22 e 23. A avaliação das imagens apresenta indícios de que não há modificação de morfologia com a inclusão dos NTC perceptíveis à escala utilizada. Com a elevação de temperatura é possível perceber maior exposição gradual dos agregados, principalmente a partir dos 300ºC, indicando desintegração da pasta de cimento em todos os traços. Após exposição a 600ºC, a pasta se mostra praticamente desintegrada. Percebe-se também que, com o aumento da temperatura-alvo de exposição, desenvolvem-se fissuras em maior quantidade e magnitude na matriz do material. Visualmente, a porosidade do material também parece aumentar com a elevação das temperaturas.

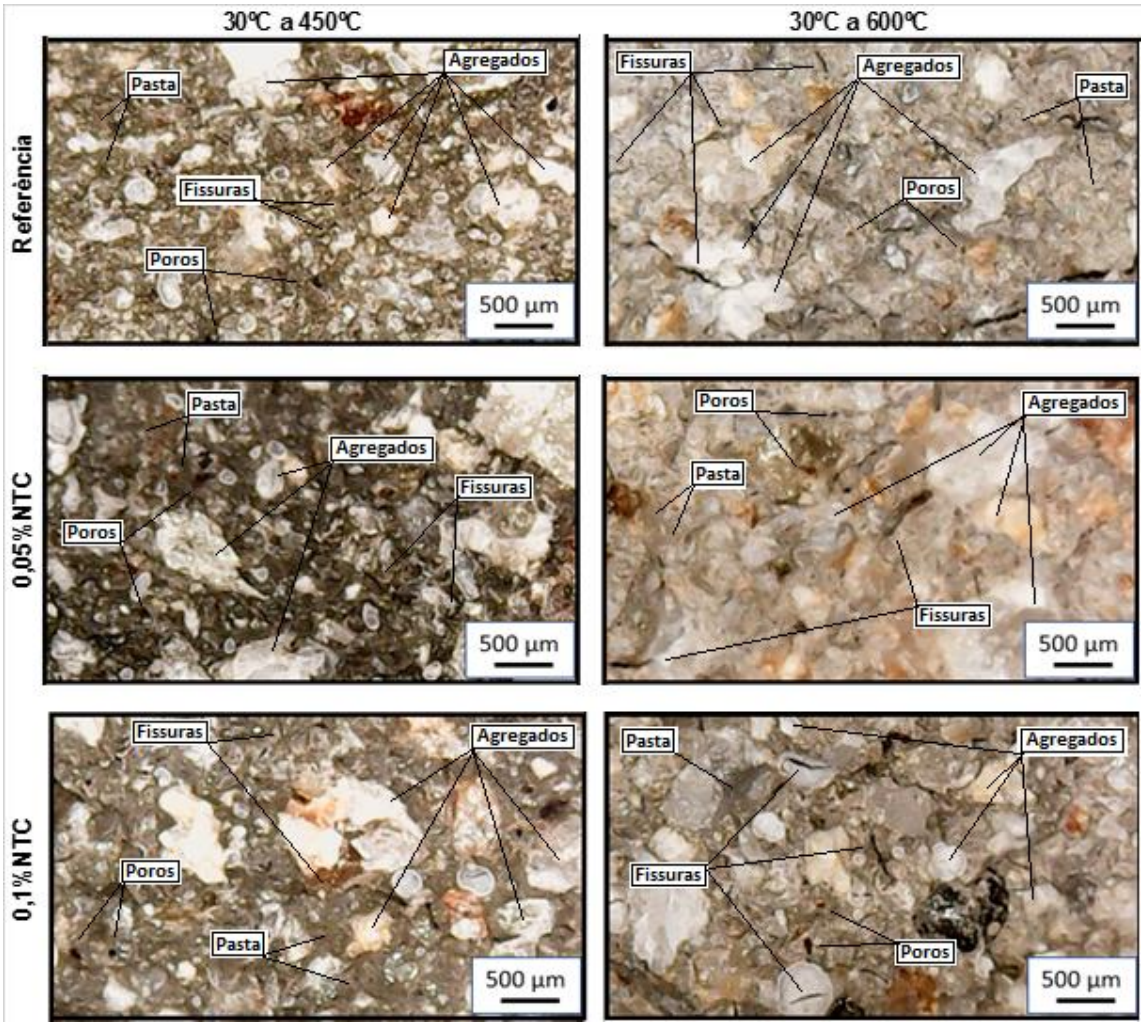
As imagens corroboram com os resultados de resistência à compressão residual, que indicam quedas sucessivas com o aumento da temperatura de exposição. Além disso, uma avaliação tátil qualitativa do material aponta a evidente desintegração da pasta a partir de 450ºC, uma vez que o material já apresenta esfarelamento. Após ser submetido a 600ºC, esse esfarelamento é ainda mais acentuado, sendo facilmente percebido ao toque.

Figura 22 – Avaliação macroestrutural da superfície de ruptura - Aquecimento lento – Parte 1



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 23 – Avaliação macroestrutural da superfície de ruptura - Aquecimento lento – Parte 2



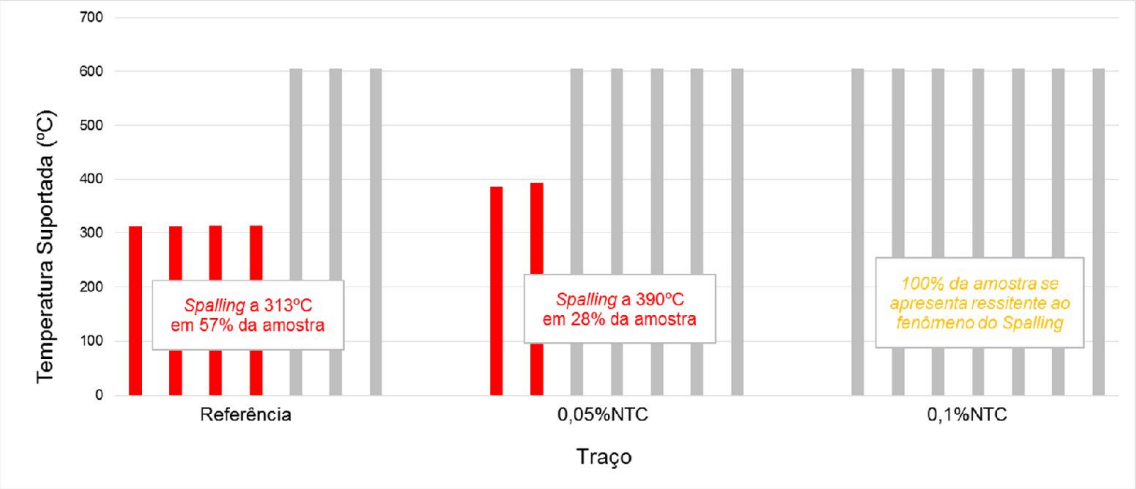
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 Resultados após aquecimento rápido

4.2.1 Spalling

Durante a realização do aquecimento rápido, observou-se *spalling* em 57% da amostra do traço de referência e 28% da amostra do traço 0,05% NTC. Já no traço de 0,1% NTC, não ocorreu explosão alguma durante todo o aquecimento. Em relação à temperatura de ocorrência, verificou-se que a explosão ocorre a 313ºC para o traço de referência, enquanto no traço 0,05% NTC, ocorre um aumento de 24,6%, elevando a temperatura de ocorrência para 390ºC (Figura 24).

Figura 24 – Ocorrência do fenômeno do *Spalling* – Aquecimento Rápido até 600ºC



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados mencionados corroboram com aqueles encontrados no regime de aquecimento lento desenvolvido na presente pesquisa, aqui também se encontram evidências de que a inclusão dos NTC é capaz de propiciar prevenção aos lascamentos explosivos. O traço de 0,1%NTC permanece sem explosões após exposição à elevação de temperatura a 600ºC e a ocorrência no traço 0,05%NTC é cerca de 49% menor que aquela verificada para a referência.

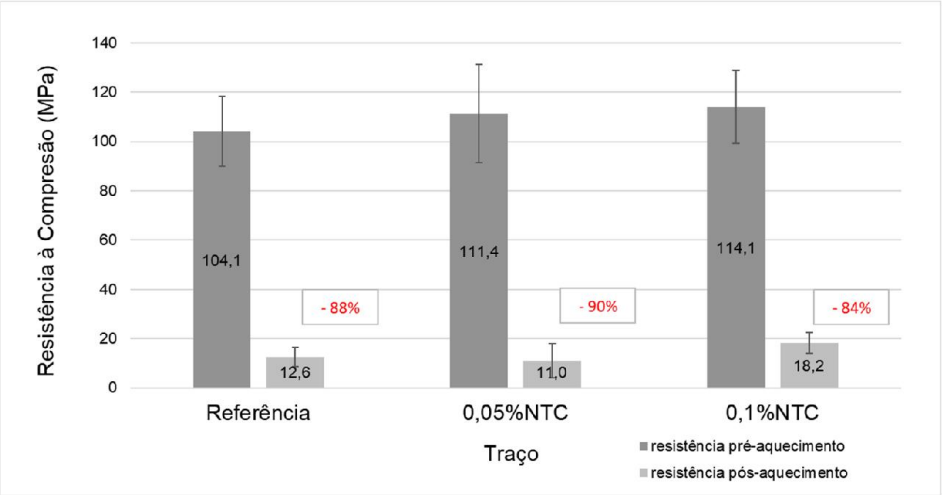
As temperaturas médias de ocorrência, 313ºC para a referência e 390ºC para o traço 0,05%NTC, estão dentro da faixa do esperado, entre 260°C a 520°C (ZHENG *et al.*, 2013). Também esperava-se que as temperaturas de ocorrência fossem maiores em razão de que com maior taxa de aquecimento os corpos de prova levam mais tempo para chegar à temperatura que conduz ao spalling, indicando maior temperatura na mufla. Nesse procedimento, com taxa de aquecimento mais elevada, as temperaturas de ocorrência são consideravelmente diferentes, entretanto, como apenas dois corpos de prova romperam por *spalling* no traço 0,05%NTC, é difícil inferir a respeito do que pode ter acarretado essa diferença.

4.2.2 Resistência à compressão residual

Após a submissão ao aquecimento a 600ºC com elevada taxa de aquecimento, avaliando-se apenas os corpos de prova remanescentes dos fenômenos do *spalling*, a resistência à compressão apresentou quedas acentuadas, sendo de 87,9%, 90% e

84% para os traços de referência, 0,05%NTC e 0,1%NTC respectivamente (Figura 25).

Figura 25 – Resistência à compressão residual – Aquecimento rápido até 600ºC



Fonte: Elaborado pelo autor.

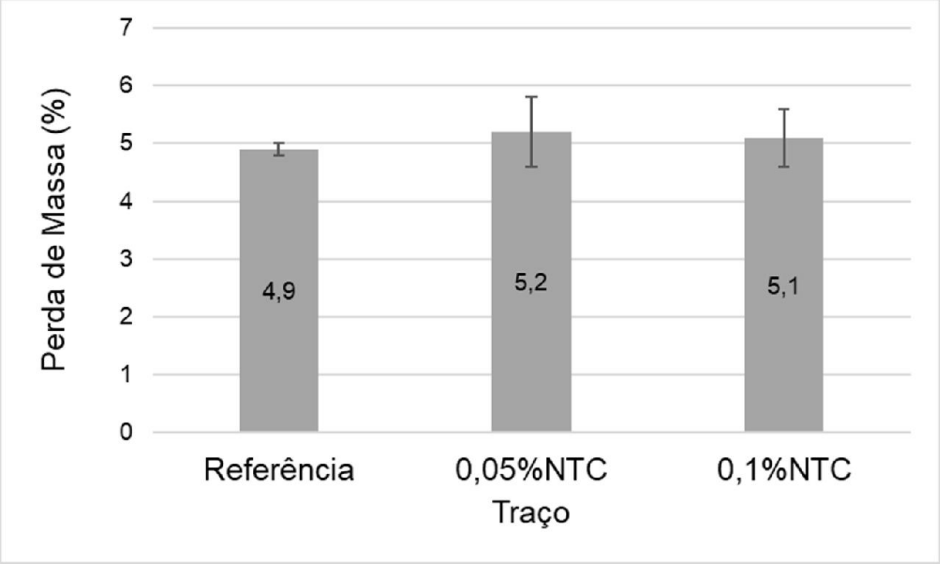
Acredita-se que possa haver influência da inclusão dos NTC na perda de resistência à compressão quando da variação da taxa de aquecimento. A queda percentual média se agrava mais no traço de referência, cerca de 9% mais elevada em relação ao aquecimento lento, apresenta-se menor no traço 0,05%NTC, cerca de 5% mais elevada em relação ao aquecimento lento, e se mantém no traço 0,1%NTC.

Uma possível razão para esses resultados pode estar no fato de que com a incorporação dos NTC, há criação de uma estrutura de poros propícia à distribuição de tensões provenientes da expansão de vapores e dilatações, que podem ser maiores em razão da elevada taxa de aquecimento. Mesmo se insuficientes para geração de *spalling*, as tensões mencionadas podem acarretar em surgimento de fissuras internas no material. Como o material de referência não conta com essa possível distribuição de tensões, podem ocorrer maiores fissurações e perdas de resistência.

4.2.3 Perda de massa

A perda de massa média verificada após o aquecimento rápido a 600ºC é de 4,9%, 5,2% e 5,1% para os traços de referência, 0,05% NTC e 0,1% NTC, respectivamente (Figura 26).

Figura 26 – Perda de Massa – Aquecimento rápido até 600ºC



Fonte: Elaborado pelo autor.

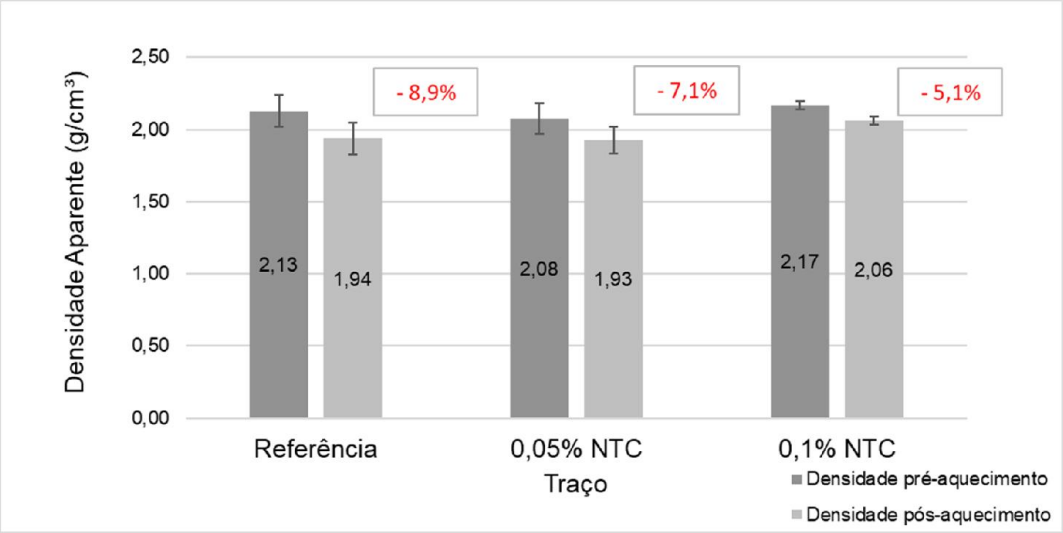
Assim como encontrado nos corpos de prova provenientes do aquecimento lento, considerando-se os devidos desvios, pode se avaliar que a perda de massa quando da elevação de temperatura em regime de aquecimento rápido praticamente não sofreu influência em razão da adição dos NTC. Os traços 0,05%NTC e 0,1% apresentaram praticamente a mesma perda de massa verificada para a referência.

Os valores encontrados aqui apresentam-se consideravelmente próximos daqueles encontrados para a terceira faixa de aquecimento lento (até 600ºC), o que indica não ter havido influência da taxa de aquecimento no processo de perda de massa. Os resultados em questão estão em concordância com o que se espera por trabalhos anteriores, Zhang e Ye (2012) submeteram pastas de cimento ao aquecimento sob taxas de 1, 2, 5, 10 e 30 K/min e observa-se que a 600ºC, as diferenças de perda de massa ficam em torno de 1%.

4.2.4 Densidade aparente

Observou-se queda de densidade aparente dos corpos de prova após submissão ao aquecimento rápido a 600ºC em todos os traços, sendo o percentual de queda de 8,9%, 7,1% e 5,1% para os traços de referência, 0,05% NTC e 0,1% NTC, respectivamente (Figura 27).

Figura 27 – Modificação de Densidade Aparente – Aquecimento rápido até 600ºC



Fonte: Elaborado pelo autor.

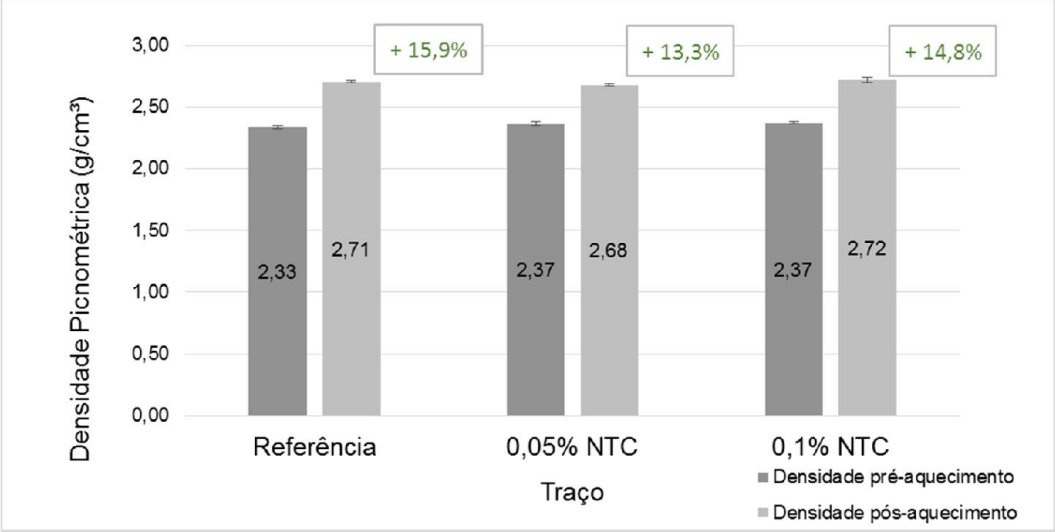
Ainda que os desvios para os traços de referência e 0,05%NTC apontem para uma equivalência prática entre os valores pré e pós-aquecimento, encontra-se uma perda percentual mais acentuada que aquela encontrada no aquecimento lento, sugerindo influência da taxa de aquecimento. Entretanto, no traço 0,1%NTC essa diferença é confirmada pelos desvios estatísticos, mas há manutenção da perda verificada no aquecimento lento.

Como a queda percentual média é maior no traço de referência, apresenta-se menor no traço 0,05%NTC e se mantém no traço 0,1%NTC, pode haver influência da inclusão dos NTC na modificação comportamental quando da variação da taxa de aquecimento. Isso pode ocorrer em razão de menor fissuração interna nos traços contendo NTC, conforme explorado no item 4.2.2.

4.2.5 Densidade picnométrica

A avaliação da densidade picnométrica através de Picnometria por Hélio indicou elevação do valor da densidade, sendo de 15,9%, 13,3% e 14,8% para os traços de referência, 0,05%NTC e 0,1%NTC respectivamente (Figura 28).

Figura 28 – Modificação de Densidade Picnométrica – Aquecimento rápido até 600ºC



Fonte: Elaborado pelo autor.

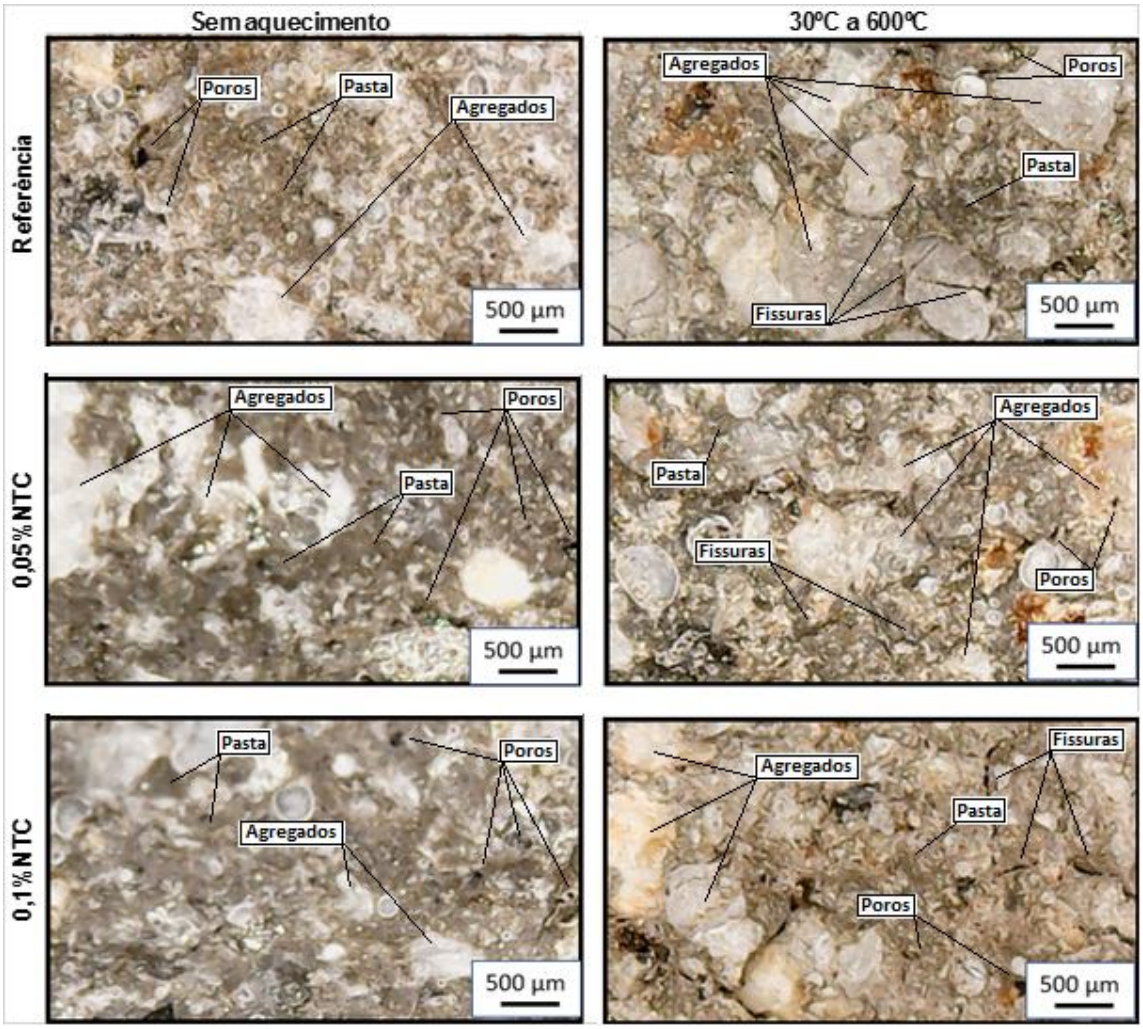
Quando comparados aos resultados obtidos no regime de aquecimento lento, não se encontram diferenças significativas. Aqui também cabe a discussão de que a suposta elevação de densidade pode estar associada ao método de verificação adotado, que pode estar considerando apenas partículas íntegras de agregado e resíduos de pasta não desintegrada, conforme item 4.2.6.

4.2.6 Avaliação da macroestrutura

As imagens obtidas para avaliação da macroestrutura após exposição a 600ºC com taxa de aquecimento rápido podem ser observadas na Figura 29.

O aspecto das imagens apresenta-se muito semelhante àquele encontrado nas imagens provenientes do aquecimento lento. Aqui também se observa a exposição dos agregados, como um indício da desintegração da pasta de cimento.

Figura 29 – Avaliação macroestrutural da superfície de ruptura - Aquecimento rápido até 600ºC



Fonte: Elaborado pelo autor.

5 CONCLUSÕES

Uma vez realizada a pesquisa envolvida no presente trabalho, conclui-se que seus objetivos foram alcançados, tendo sido possível a validação do método de dispersão de NTC adotado para a produção de CUAD e a avaliação do desempenho de CPR reforçados com NTC quando em elevadas temperaturas. Os resultados encontrados permitem inferências acerca do assunto abordado.

Em relação à ocorrência do fenômeno do *spalling*, conclui-se que a incorporação de NTC no traço de CPR apresentou influência direta em sua ocorrência. O traço de 0,1%NTC apresentou-se bastante resistente ao fenômeno em questão quando submetido aos aquecimentos estabelecidos, tendo apresentado apenas 3,57% de ocorrência quando considerado todo o experimento. Além disso, o desempenho do traço 0,05%NTC foi superior àquele apresentado pela referência em todas as faixas de temperatura e taxas de aquecimento.

A taxa de aquecimento pode apresentar influência sobre a ocorrência do *spalling*. Quando aquecida com maior taxa, a amostra de referência rompe mais que aquela submetida ao aquecimento lento, essa maior incidência de rompimentos pode estar relacionada ao desenvolvimento mais rápido de tensões internas do material, às quais conduzem ao *spalling*.

A resistência à compressão residual após aquecimento indica que a incorporação dos NTC pode ter efeitos positivos quando em temperaturas menos elevadas. Na elevação a 300ºC, observou-se melhor desempenho dos traços com NTC, o traço 0,1%NTC apresenta praticamente uma manutenção de sua resistência pré-aquecimento, o traço 0,05%NTC perde cerca de 6% enquanto a referência perde 13,5% de sua resistência original. Quando se trata de temperaturas mais elevadas, tanto nas faixas de 450ºC quanto 600ºC, apesar de as diferenças entre os traços terem sido pequenas, os traços com NTC apresentaram maiores quedas percentuais.

Os valores obtidos apresentam quedas de resistência crescentes com o aumento da temperatura para todos os traços, independentemente da taxa de aquecimento. Isso pode ocorrer em razão das maiores temperaturas por mais tempo, o que promove a desintegração da pasta de cimento. Esse efeito está consoante com a redução que se espera na resistência à compressão com o aumento do tempo em elevadas temperaturas já abordado na literatura (WANG ET. AL, 2015).

A taxa de aquecimento apresentou efeitos sobre a resistência à compressão residual quando comparados os resultados de aquecimento lento e rápido a 600ºC. Quando considerado o aquecimento rápido, a queda percentual média é maior no traço de referência, cerca de 9% mais elevada em relação ao aquecimento lento, apresenta-se menor no traço 0,05%NTC, cerca de 5% mais elevada em relação ao aquecimento lento, e se mantém no traço 0,1%NTC.

Os valores encontrados para a perda de massa sugerem que não há efeitos significativos da adição de NTC nesse aspecto. Independentemente da taxa de aquecimento, as perdas são praticamente iguais entre os traços ensaiados. A perda de massa cresce com a temperatura e aparentemente não sofre influência da taxa de aquecimento, já que os resultados apresentados para submissão a 600ºC são praticamente os mesmos para aquecimento lento e rápido.

Ao avaliar as modificações de densidade, percebe-se que os resultados da densidade aparente são mais consistentes com a modificação promovida pela elevação de temperatura. A densidade aparente decresce com as elevações de temperatura, refletindo a perda de integridade e de resistência do material.

A densidade picnométrica medida por picnometria por Hélio apresentou elevação de densidade com o aumento das temperaturas. Esse efeito não condiz com a condição real do material. Uma possível razão para esses resultados pode estar no método de medição. Acredita-se que o Picnômetro, ao avaliar a densidade das amostras com átomos de Hélio, esteja avaliando apenas as partículas íntegras do material, basicamente agregados, além de algum resíduo de pasta de cimento ainda aderido às mesmas, o que poderia levar a resultados semelhantes aos encontrados.

As avaliações de macroestrutura do material corroboram com a ideia de que a picnometria tenha medido a densidade dos agregados com resíduos de pasta desintegrada. Após as submissões às elevadas temperaturas, principalmente a partir de 300ºC, independentemente da taxa de aquecimento, percebe-se maior exposição dos agregados, fissuração e indícios de maior porosidade, indicando desintegração da pasta de cimento. A desintegração é também apoiada pelo aspecto físico do material, uma avaliação tátil qualitativa aponta a evidente desintegração da pasta a partir de 450ºC, uma vez que o material já apresenta esfarelamento. Após ser submetido a 600ºC, esse esfarelamento é ainda mais acentuado, sendo facilmente percebido ao toque.

REFERÊNCIAS

ABBAS, S.; NEHDI, M. L.; SALEEM, M. A. Ultra-High Performance Concrete: Mechanical Performance, Durability, Sustainability and Implementation Challenges. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 10, n. 3, p. 271–295, 28 set. 2016a/b.

ABID, M. et al. High temperature and residual properties of reactive powder concrete – A review. **Construction and Building Materials**, v. 147, n. 519, p. 339–351, 2017.

ALKAYSI, M.; EL-TAWIL, S. Effects of variations in the mix constituents of ultra high performance concrete (UHPC) on cost and performance. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 49, n. 10, p. 4185–4200, 2016.

ALSHAREF, J. M. A.; TAHA, M. R.; KHAN, T. A. Physical dispersion of nanocarbons in composites – A review. **Jurnal Teknologi**, v. 79, n. 5, p. 69–81, 2017.

AMIN, M. S.; EL-GAMAL, S. M. A.; HASHEM, F. S. Fire resistance and mechanical properties of carbon nanotubes – clay bricks wastes (Homra) composites cement. **Construction and Building Materials**, v. 98, p. 237–249, 2015.

AQEL, A. et al. Carbon nanotubes, science and technology part (I) structure, synthesis and characterisation. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 5, n. 1, p. 1–23, 2012.

BAQERSAD, Mohamadtaqi; SAYYAFI, Ehsan Amir; BAK, Hamid Mortazavi. State of the art: mechanical properties of ultra-high performance concrete. **Civil Engineering Journal,** v. 3, n. 3, p. 190-198, 2017.

BARBOSA, Marília Inês Mendes; PORPHÍRIO, Ney Hamilton. Caracterização tecnológica de lascas de quartzo. 1995.

BATISTON, E. R. **Estudo exploratório dos efeitos de nanotubos de carbono em matrizes de cimento portland**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina. p. 97. Florinópolis, 2007.

BATISTON, E. R. **Incorporação de nanotubos de carbono em matriz de cimento portland.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina. p. 152. Florinópolis, 2012.

BEN GRAYBEAL. Ultra-High Performance Concrete. **Research, Development, and Technology,** Turner-Fairbank Highway Research Center**.**, p. 8, 2011.

CANBAZ, M. The effect of high temperature on reactive powder concrete. **Construction and Building Materials**, v. 70, p. 508–513, 2014.

CASTRO, A. L. DE; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, v. 55, n. 333, p. 18–32, 2009.

CHOE, G. et al. Evaluation of the mechanical properties of 200 MPa ultra-high-strength concrete at elevated temperatures and residual strength of column. **Construction and Building Materials**, v. 86, p. 159–168, 2015.

COSTA, Carla Neves; FIGUEIREDO, Antonio Domingues de; SILVA, Valdir Pignatta. Aspectos tecnológicos dos materiais de concreto em altas temperaturas. **NUTAU'2002. Sustentabilidade arquitetura desenho urbano: seminário internacional**, 2002.

COSTA, Carla Neves; SILVA, Valdir Pignatta. Revisão histórica das curvas padronizadas de incêndio. **Seminário Internacional NUTAU**, 2006.

Elkem. User Guide Elkem Materials Mixture Analyser – EMMA Contents. v.1, p. 35, [s.d.].

FELICETTI, Roberto et al. Mechanical behaviour of HPC and UHPC in direct tension at high temperature and after cooling. In: **Fifth RILEM symposium on fibre-reinforced concretes**, N. 2000. p. 749-758.

GANESH, V. K. Nanotechnology in Civil Engineering [interaktyvus]. **Engineeringcivil.Com**, v. 8, n. 27, p. 12, 2013.

GU, C. et al. Effect of curing conditions on the durability of ultra-high performance concrete under flexural load. **Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.**, v. 31, n. 2, p. 278–285, 13 abr. 2016.

IIJIMA, S. Carbon nanotubes: Past, present, and future. **Physica B: Condensed Matter**, v. 323, n. 1–4, p. 1–5, 2002.

JU, Y. et al. Investigation on thermophysical properties of reactive powder concrete. **Science China Technological Sciences**, v. 54, n. 12, p. 3382–3403, 2011.

KHITAB, A.; ARSHAD, M. T. Nano construction materials: Review. **Reviews on Advanced Materials Science**, v. 38, n. 2, 2014.

LEE, N. K. et al. Microstructural investigation of calcium aluminate cement-based ultra-high performance concrete (UHPC) exposed to high temperatures. **Cement and**

Concrete Research, v. 102, n. February, p. 109–118, 2017.

LIM, J. L. G. et al. Synthesis of Ultra-High Performance Cementitious Composite incorporating Carbon Nanotubes. In: **6th International Conference on Structural Engineering and Construction Management.** 2015. p. 8-13.

LIU, C. T.; HUANG, J. S. Fire performance of highly flowable reactive powder concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 5, p. 2072–2079, 2009.

LU, Liulei; OUYANG, Dong; XU, Weiting. Mechanical properties and durability of ultra high strength concrete incorporating multi-walled carbon nanotubes. **Materials**, v. 9, n. 6, p. 419, 2016.

MA, Jianxin et al. Comparative investigations on ultra-high performance concrete with and without coarse aggregates. In: **Proceedings of international symposium on ultra high performance concrete**, Germany. 2004. p. 205-212.

MARCONDES, C. G. N. et al. Revista ALCONPAT. p. 97–115, 2015.

MORSY, M. S.; ALSAYED, S. H.; AQEL, M. Hybrid effect of carbon nanotube and nano-clay on physico-mechanical properties of cement mortar. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 1, p. 145–149, 2011.

NAZRI, Fadzli Mohamed et al. Fire resistance of ultra-high performance fibre reinforced concrete due to heating and cooling. In: **MATEC Web of Conferences.** EDP Sciences, 2017. p. 01021.

OLIVEIRA, C. O. E. et al. Impacto do conceito de empacotamento de partículas na dosagem de concretos de alto desempenho. **Revista Materia**, v. 23, n. 1, 2018.

PAULA, Junia Nunes de. **Comportamento reológico e mecânico de pastas de cimento fabricado com nanotubos de carbono crescidos em clinquer para poços de petróleo**. Tese (Doutorado em Estruturas) - Universidade Federa de Minas Gerais, p. 148. 2014.

PENG, Gai-Fei; HUANG, Zhi-Shan. Change in microstructure of hardened cement paste subjected to elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 4, p. 593-599, 2008.

PERELLES, D. H.; MEDEIROS, M. F. .; GARCEZ, M. R. Revista ALCONPAT. **Alconpat**, v. 3, p. 161–176, 2013.

PERRY, V. H.; SEIBERT, P. J. Fifteen Years of UHPC Construction Experience in Precast Bridges in North America. **RILEM-fib-AFGC Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete UHPFRC 2013**, n. 1, p. 229–238, 2013.

QUEIROZ, Inácio Santiago de Oliveira. **Desenvolvimento de concretos de ultra-alta resistência com uso de materiais disponíveis na região do norte de Minas Gerais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). cefet-mg, Belo Horizonte, p. 73. 2018.

RICHARD, P.; CHEYREZY, M. Composition of reactive powder concretes. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 7, p. 1501–1511, 1995.

ROCHA, Vanessa Vilela. **Diferentes estratégias de dispersão de nanotubos de carbono para preparação e caracterização de nanocompósitos de cimento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), p. 137. 2018.

ROUQUEROL, J. et al. Recommendations for the characterization of porous solids (Technical Report). **Pure and Applied Chemistry**, v. 66, n. 8, p. 1739-1758, 1994.

RUSSELL, Henry G. et al. Ultra-high performance concrete: a state-of-the-art report for the bridge community. United States. Federal Highway Administration. **Office of Infrastructure Research and Development**, 2013.

SALVETAT, J.-P.; BONARD, J.-M.; THOMSON, N. H. Mechanical properties of carbon nanotubes. **Applied Physics A**, v. 69, n. 3, p. 255–260, 1999.

SANCHEZ, F.; SOBOLEV, K. Nanotechnology in concrete – A review. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 11, p. 2060–2071, 2010.

SBIA, L. A. et al. Production methods for reliable construction of ultra-high-performance concrete (UHPC) structures. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 50, n. 1, p. 1–19, 2017.

SHAFIEIFAR, M.; FARZAD, M.; AZIZINAMINI, A. Experimental and numerical study on mechanical properties of Ultra High Performance Concrete (UHPC). **Construction and Building Materials**, v. 156, p. 402–411, 2017.

SHI, C. et al. A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design. **Construction and Building Materials**, v. 101, n. Part 1, p. 741–751, 2015a.

SHI, C. et al. A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design. **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 741–751, 2015b.

SILVA, Valdir Pignatta. Segurança das estruturas em situação de incêndio-Uma visão da América Latina. **Revista Flammae-seção**, 2015.

SOUZA, T. C. et al. Nanotubos de carbono: Um caminho para a sustentabilidade de materiais cimentícios. **Concreto e Construções**, v. 1, n. 77, p. 20-24, 2015.

SPIESZ, P. R.; HUNGER, Martin. Durability of ultra-high performance concrete– Experiences from a real-scale application. In: **14th International Conference on Durability of Building Materials and Components (14th DBMC), 29-31 May 2017, Ghent, Belgium**. 2017.

SPIESZ, P. R.; HUNGER, M. Towards a more common use of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) – development of UHPC for ready-mix and prefabrication concrete plants. **11th High Performance Concrete conference, HPC Tromso 2017**, p. 1–10, 2017b.

SZELAG, Maciej. Mechano-physical properties and microstructure of carbon nanotube reinforced cement paste after thermal load. **Nanomaterials**, v. 7, n. 9, p. 267, 2017.

TAFRAOUI, A. et al. Metakaolin in the formulation of UHPC. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 2, p. 669–674, 2009.

TAI, Y. S.; PAN, H. H.; KUNG, Y. N. Mechanical properties of steel fiber reinforced reactive powder concrete following exposure to high temperature reaching 800 °c. **Nuclear Engineering and Design**, v. 241, n. 7, p. 2416–2424, 2011.

TEIXEIRA, C. S.; CORDON, H. C. F. Estudo da influência do empacotamento de partículas nas propriedades do concreto. **21° Simpósio internacional de iniciação científica da USP**, v. 53, n. 9, p. 1689–1699, 2013.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Ibracon, v. 2, n. 1990, p. 1283–1325, 2011.

VAN, V. et al. Cement & Concrete Composites Rice husk ash as both pozzolanic admixture and internal curing agent in ultra-high performance concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 53, p. 270–278, 2014.

WANG, C. et al. Preparation of Ultra-High Performance Concrete with common technology and materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 4, p. 538–544, 2012.

WANG, D. et al. A review on ultra high performance concrete: Part II. Hydration, microstructure and properties. **Construction and Building Materials**, v. 96, p. 368–377, 2015.

WILLE, K.; NAMAN, A. E.; PARRA-MONTESINOS, G. J. Ultra - High Performance Concrete with Compressive Strength Exceeding 150 MPa (22ksi) : A Simpler Way. **ACI Materials Journal**, v. 108, n. 1, p. 46–53, 2011.

XIAO-YONG, W.; LI-NA, Z. Simulation of Chloride Diffusion in Cracked Concrete with Different Crack Patterns. **Advances in Materials Science and Engineering**, 2016.

XIONG, M.-X.; LIEW, J. Y. R. Spalling behaviour and residual resistance of fibre reinforced Ultra-High performance concrete after exposure to high temperatures. **Material de construction**, v. 65, n. 320, 2015.

YAZICI, H. et al. Utilization of fly ash and ground granulated blast furnace slag as an alternative silica source in reactive powder concrete. **Fuel**, v. 87, n. 12, p. 2401–2407, 2008.

YE, H. W. et al. Research on fire resistance of ultra-high-performance concrete. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2012, n. 2, 2012.

YIGITER, H. et al. Mechanical performance of low cement reactive powder concrete (LCRPC). **Composites Part B: Engineering**, v. 43, n. 8, p. 2907–2914, 2012.

YU, R.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H. J. H. Effect of nano-silica on the hydration and microstructure development of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with a low binder amount. **Construction and Building Materials**, v. 65, p. 140–150, 2014a.

YU, R.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H. J. H. Mix design and properties assessment of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC). **Cement and Concrete Research**, v. 56, p. 29–39, 2014b.

YU, R.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H. J. H. Development of an eco-friendly Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses. **Cement and Concrete Composites**, v. 55, p. 383–394, 2015.

YU, Zechuan; LAU, Denvid. Evaluation on mechanical enhancement and fire resistance of carbon nanotube (CNT) reinforced concrete. **Coupled Syst. Mech**, v. 6, p. 335-349, 2017.

ZARBIN, A. J. G.; OLIVEIRA, M. M. Nanoestruturas de carbono (nanotubos, grafeno): Quo vadis **Quimica Nova**, v. 36, n. 10, p. 1533–1539, 2013.

ZHANG, L. W.; KAI, M. F.; LIEW, K. M. Composites : Part A Evaluation of microstructure and mechanical performance of CNT- reinforced cementitious

composites at elevated temperatures. **Composites Part A**, v. 95, p. 286–293, 2017.

ZHANG, Q.; YE, G. Dehydration kinetics of Portland cement paste at high temperature Dehydration kinetics of Portland cement paste at high temperature. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, n. October, 2012.

ZHENG, W.; LUO, B.; WANG, Y. Compressive and tensile properties of reactive powder concrete with steel fibres at elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 41, p. 844–851, 2013.

ANEXOS

ANEXO I – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTICA DO CIMENTO

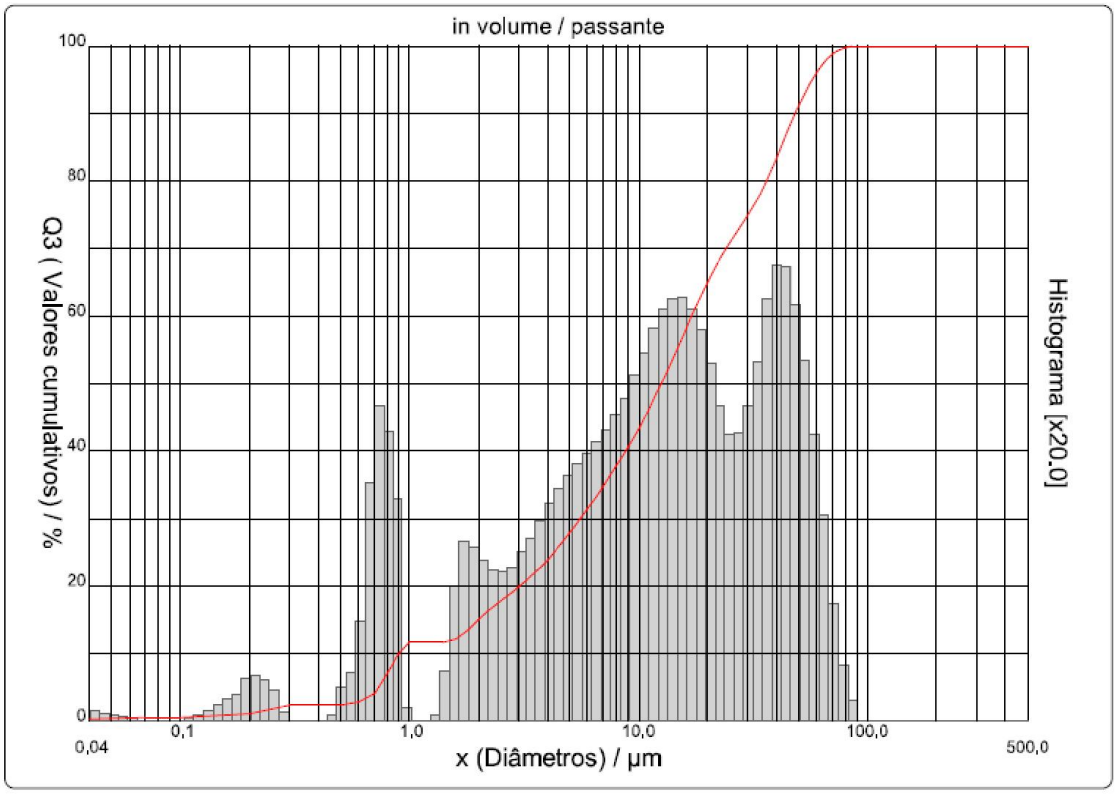
DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1064 Líquido

Faixa : 0,04 µm – 500,00 µm / 100 Classes

Ref da amostra	: CPVCauê
NTCs	: Cimento
Tipo amostra	: Cimento
Comentários	: CimetoCPVCauê
Líquido	: Isopropyl alcohol
Agente dispersante	: None
Operador	: IC-Studet
Empresa	: CEFET
Localização	: Belo Horizonte - MG
Data : 04/05/2018	Hora : 17:34:37
Índice med.	: 818
Database name	: Granulog

Ultrasom	: 60 s (+durante)
Obscuration	: 14 %
Diâmetro a 10%	: 0,90 µm
Diâmetro a 50%	: 12,56 µm
Diâmetro a 90%	: 48,40 µm
Diâmetro médio Fraunhofer	: 19,12 µm
Densidade/Fator	----------
Superfície específica	----------
Diluição automática	: Não / Não
Medida./Limp.	: 60s/60s/4
SOP name	: CPVCauê



Fonte: Obtido pelo autor em equipamento de granulometria a laser.

ANEXO II – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA SÍLICA ATIVA

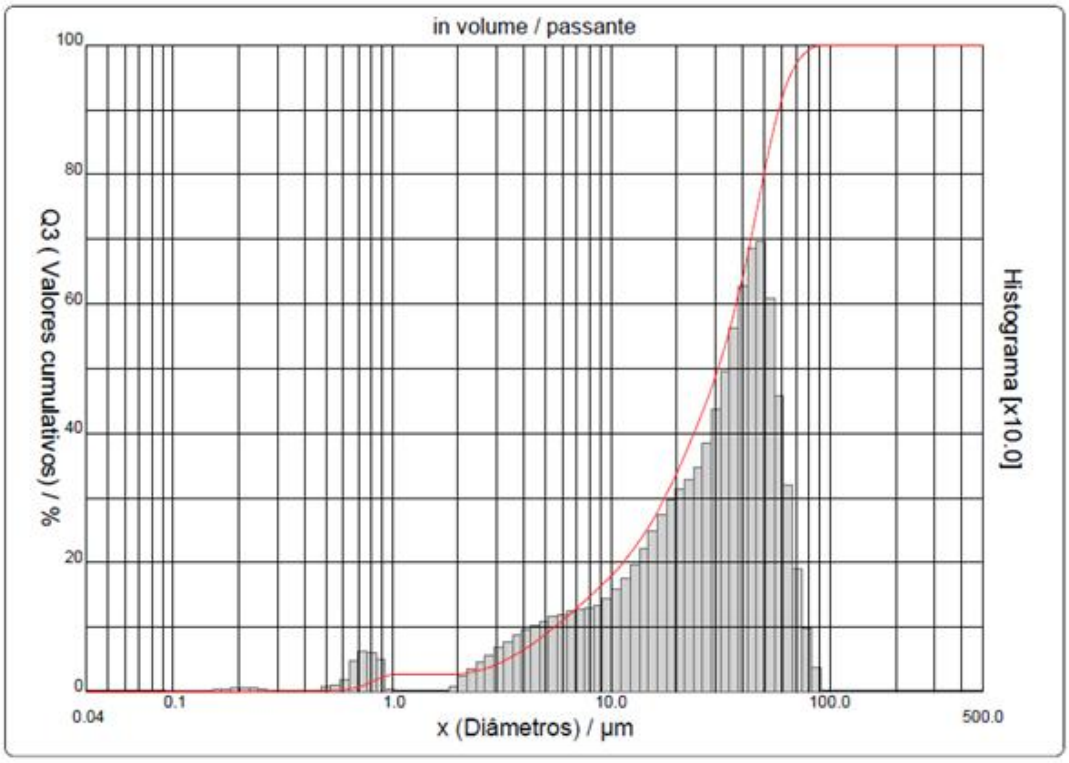
DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1064 Líquido

Faixa : 0.04 µm - 500.00 µm / 100 Classes

Ref da amostra	: Microsilica
NTCs	: Microssilica
Tipo amostra	: Microsilica
Comentários	:
Líquido	: Water (eau)
Agente dispersante	: None
Operador	: IC-Studet
Empresa	: CEFET
Localização	: Belo Horizonte - MG
Data : 04/05/2018	Hora : 16:44:22
Índice med.	: 816
Database name	: Granulog

Ultrasom	: 60	s (+durante)
Obscuration	: 13 %	
Diâmetro a 10%	: 5.51	µm
Diâmetro a 50%	: 30.84	µm
Diâmetro a 90%	: 58.25	µm
Diâmetro médio Fraunhofer	: 31.60	µm
Densidade/Fator	----------	
Superfície específica	----------	
Diluição automática	: Não / Não	
Medida./Limp.	: 60s/60s/4	
SOP name	: Microsilica	



Fonte: Obtido pelo autor em equipamento de granulometria a laser.

ANEXO III – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA PORÇÃO MENOR QUE 500 µm DA ESCÓRIA GRANULADA DE ALTO FORNO

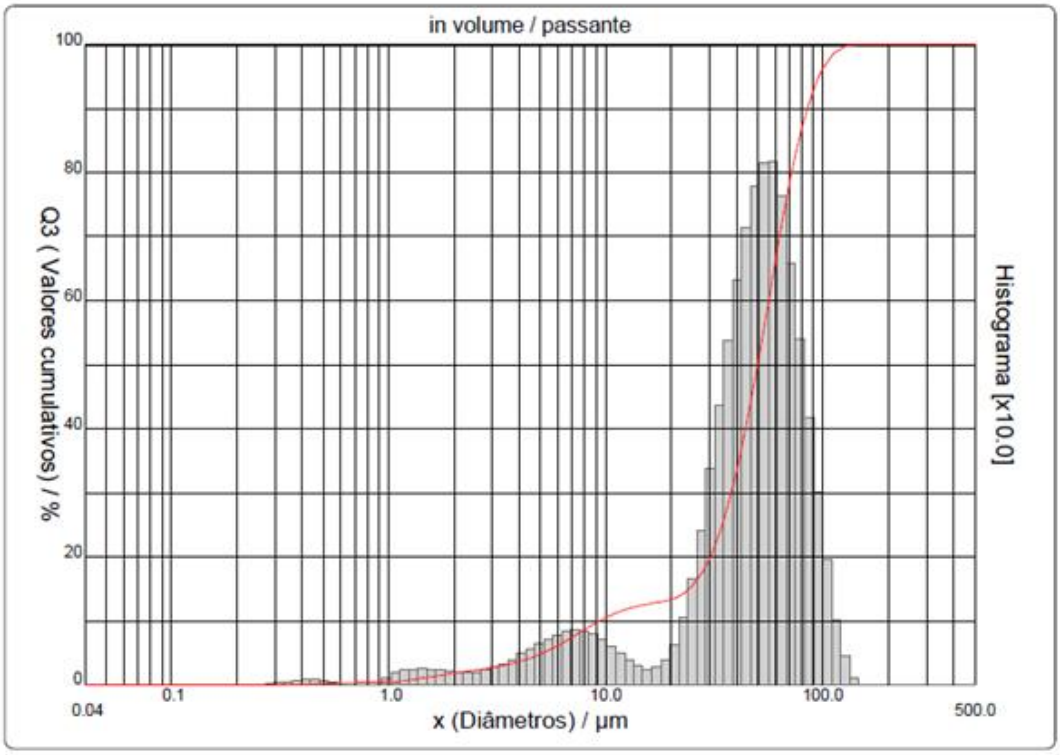
DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1064 Líquido

Faixa : 0.04 µm - 500.00 µm / 100 Classes

Ref da amostra	: EGAF
NTCs	: escória moída
Tipo amostra	: escória
Comentários	: EGAF
Líquido	: Water (eau) / -1.000
Agente dispersante	: None
Operador	: IC-Studet
Empresa	: CEFET
Localização	: Belo Horizonte - MG
Data : 04/05/2018	Hora : 19:35:41
Índice med.	: 820
Database name	: Granulog

Ultrasom	: 60 s (+durante)
Obscuration	: 5 %
Diâmetro a 10%	: 9.32 µm
Diâmetro a 50%	: 49.86 µm
Diâmetro a 90%	: 84.44 µm
Diâmetro médio	: 50.42 µm
Mie	: 1.680-0.100/1.000
Densidade/Fator	----------
Superfície específica	----------
Diluição automática	: Não / Não
Medida./Limp.	: 60s/60s/4
SOP name	: EGAF



Fonte: Obtido pelo autor em equipamento de granulometria a laser.

ANEXO IV – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA PORÇÃO MENOR QUE 500 µm DA AREIA MÉDIA

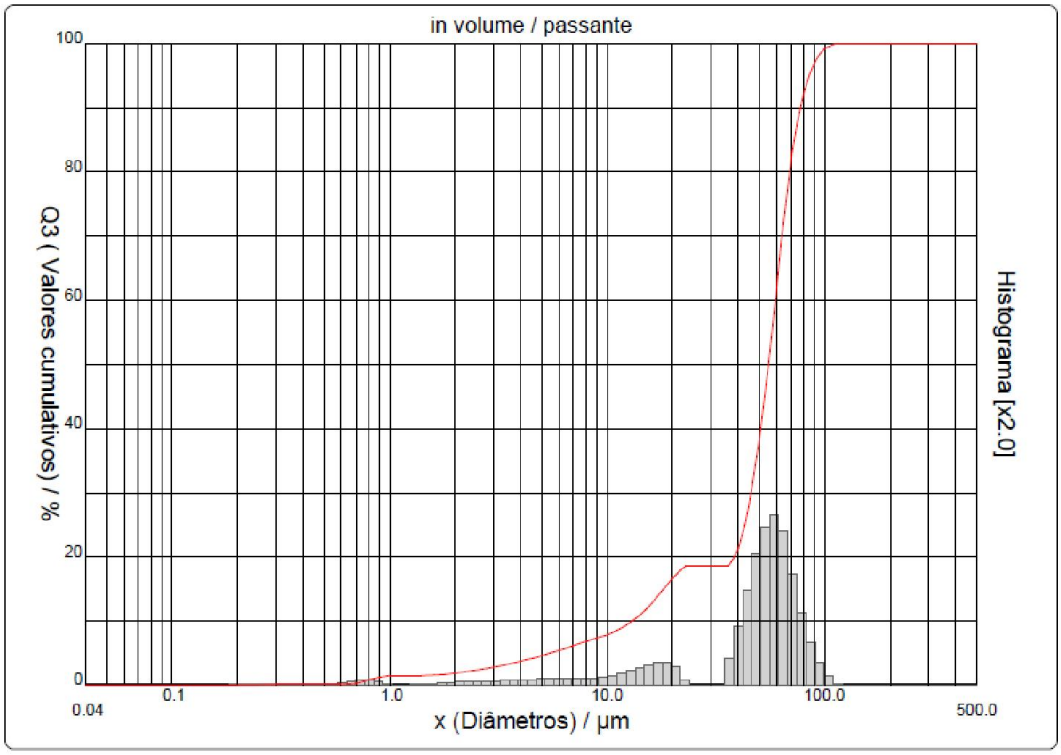
DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1064 Líquido

Faixa : 0.04 µm - 500.00 µm / 100 Classes

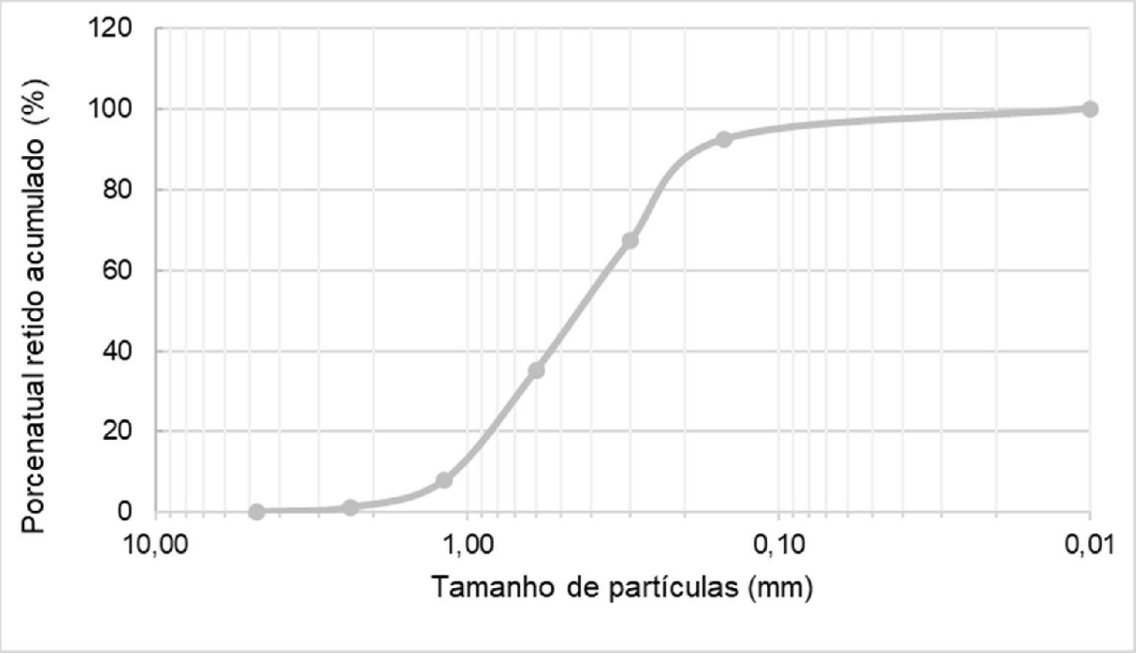
Ref da amostra	: Areia
NTCs	: Areia
Tipo amostra	: areia
Comentários	: Areia
Líquido	: Water (eau)
Agente dispersante	: None
Operador	: IC-Studet
Empresa	: CEFET
Localização	: Belo Horizonte - MG
Data : 14/05/2018	Hora : 18:19:20
Índice med.	: 824
Database name	: Granulog

Ultrasom	: 60 s (+durante)
Obscuration	: 11 %
Diâmetro a 10%	: 13.01 µm
Diâmetro a 50%	: 55.00 µm
Diâmetro a 90%	: 77.34 µm
Diâmetro médio	: 51.45 µm
Fraunhofer	
Densidade/Fator	----------
Superfície específica	----------
Diluição automática	: Não / Não
Medida./Limp.	: 60s/60s/4
SOP name	: AreiaFia



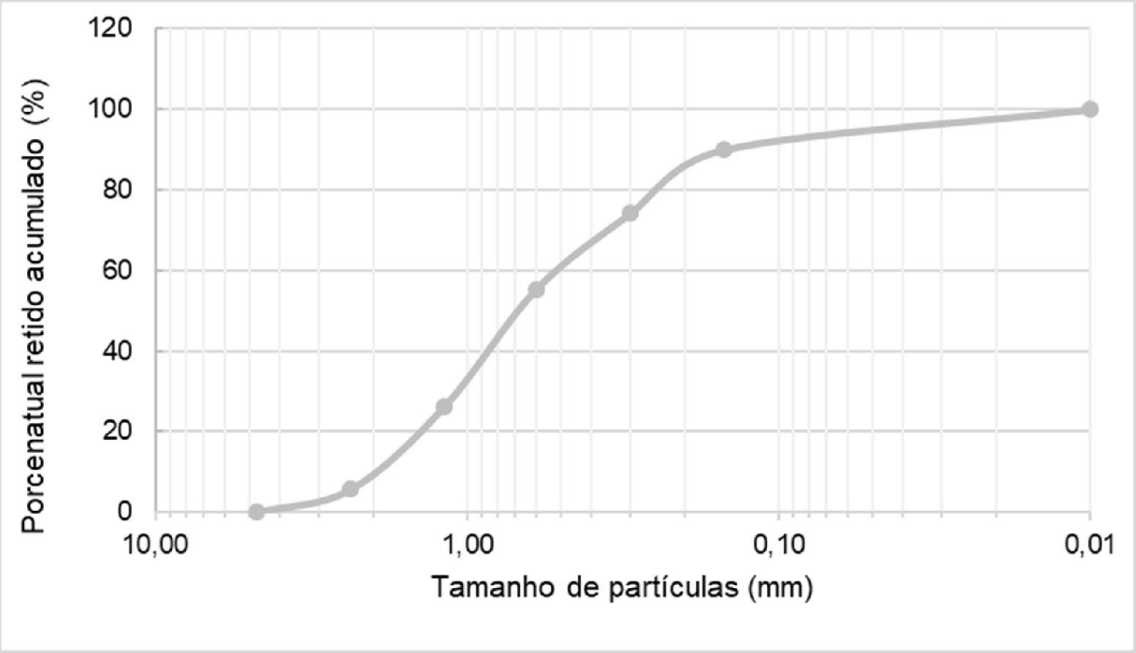
Fonte: Obtido pelo autor em equipamento de granulometria a laser.

ANEXO VI – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA ESCÓRIA GRANULADA DE ALTO FORNO POR PENEIRAMENTO, DE ACORDO COM ABNT NBR NM 248, 2003



Fonte: Elaborado pelo autor.

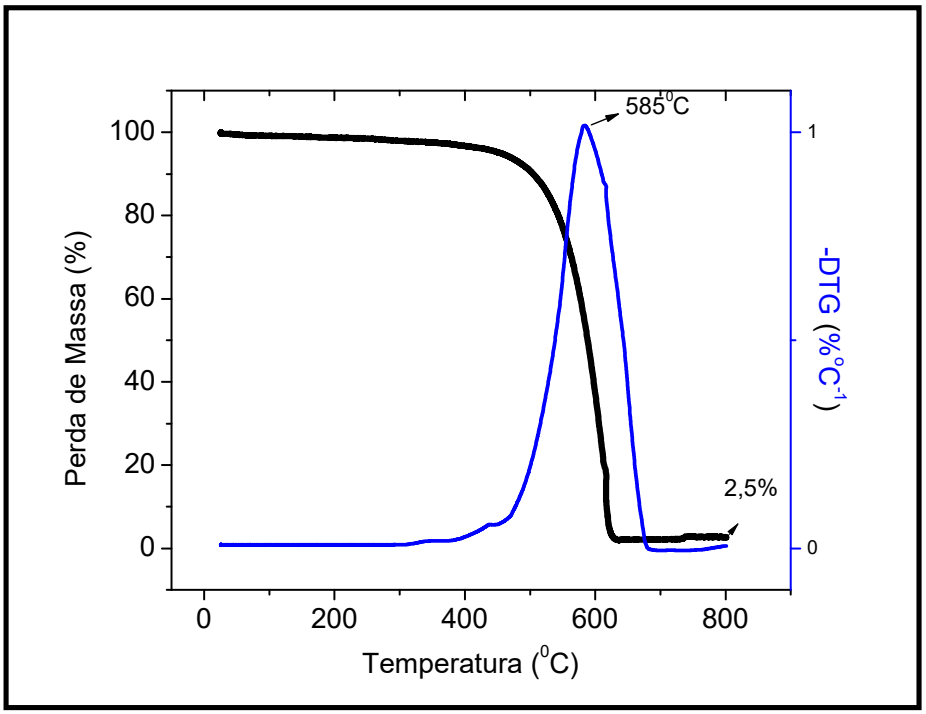
ANEXO VII – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA AREIA MÉDIA POR PENEIRAMENTO, DE ACORDO COM ABNT NBR NM 248, 2003



Fonte: Elaborado pelo autor.

ANEXO VIII – IFORMAÇOES TÉCNICAS NANOUBOS DE CARBONO DE PAREDES MÚLTIPLAS – CTNANO MWCNT HP2627

Análises de TG e DTG MWNT



MWCNT HP2627– DEPOSIÇÃO QUIMICA DA FASE DE VAPOR

Pureza de Nanotubos: > 93%

Outras estruturas de carbono: < 2%

Contaminantes: < 5% de Pó catalisador (MgO – Co – Fe).

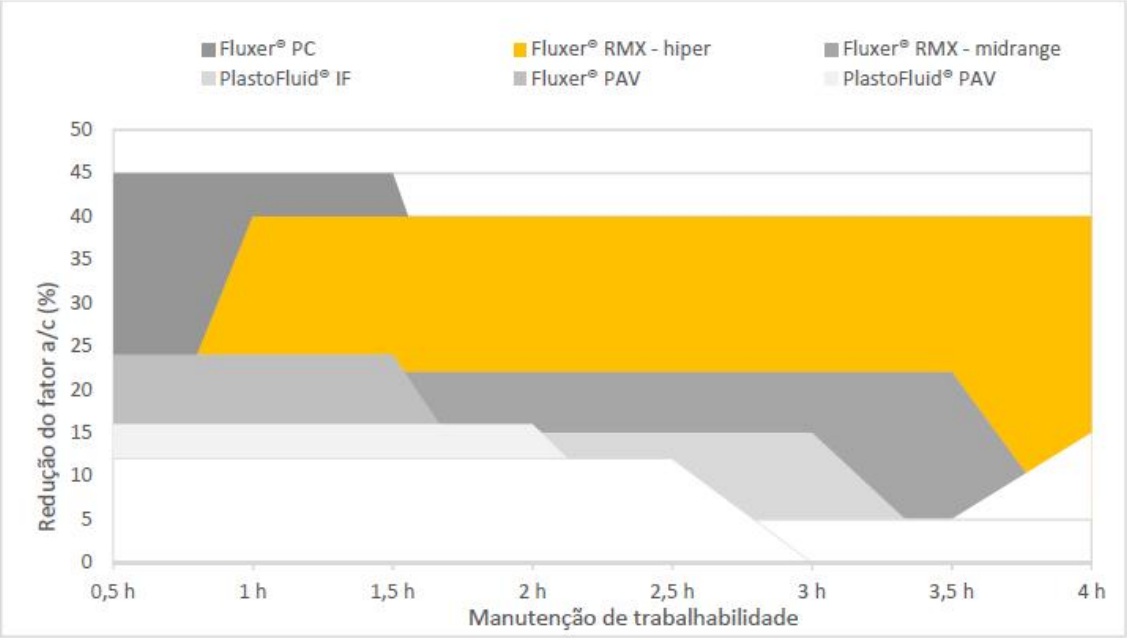
99% dos Tubos com Diâmetro Externo: entre 10 nm e 50 nm.

Comprimento dos Tubos Estimados: entre 5µm e 30 µm.

ANEXO IX – IFORMAÇOES TÉCNICAS ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE ERCA FLUXER RMX 7350

Especificação:

É a família de aditivos de alta manutenção de trabalhabilidade e redução de água. A base de policarboxilatos, podem ter adição de retardadores, entre outras matérias-primas. Estes aditivos são classificados pela ABNT NBR 11768 como sendo SP-II e pela ASTM C 494 como tipos F.



Benefícios:

- Alta redução de água na mistura; Elevado crescimento da resistência final; Alto potencial de redução do consumo de cimento; Aumento significativo da fluidez e trabalhabilidade; Incremento da coesão e redução da exsudação; Minimização da retração e fissuração; Redução da permeabilidade e aumento da durabilidade.

Campo de Aplicação:

- Concreto autoadensável (CAA); Concreto de alto desempenho (CAD); Concreto sujeito a longos períodos de transporte; Concreto aplicado em altas temperaturas (verão);

Descrição do produto:

Produto	Tipo	Características	Aspecto líquido	Dosagem sugerida (*)	Densidade (g / cm^3)	Qtd por IBC e bombona
Fluxer RMX 7350	SP-II R	Redução de até 40% de água, alta manutenção de trabalhabilidade e alta resistência inicial	Castanho claro	0,5 a 1,1%	1,080 a 1,120	1.050 kg e 210 kg

(*) Dosagem sobre o peso do cimento. O teor ideal de aditivo depende de testes em laboratório e/ou campo. O percentual ideal varia de acordo com o tipo de cimento, presença de adições, características dos agregados, tipo do equipamento de mistura, etc. Em caso de uso fora da faixa sugerida, recomendamos consultar nosso suporte técnico.

Recomendações de uso:

- Os aditivos devem preferencialmente ser adicionados à mistura após cerca de 2/3 da água total de amassamento, para facilitar dispersão na mistura e evitar absorção pelos materiais secos;

- Todos os aditivos da família Fluxer® RMX são compatíveis com as demais linhas de aditivo Erca. Entretanto, no caso de utilizar mais de um aditivo na mistura, recomenda-se que a dosagem seja realizada em separado;

PPGEC – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil
Av Amazonas, 7675, Belo Horizonte-MG
www.civil.cefetmg.br/mestrado

Capa Disserta o Saida
quinta-feira, 30 de mar o de 2017 14:42:18